

Risk Management associated to desing and construction of T.B.M tunnel linings with precast segments

Treball realitzat per:

Maria García Salvador

Dirigit per:

Javier Pablo Ainchil Lavin

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, **Setembre 2017**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank all those who have given me their support while carrying out this academic work, and helped to see it through. Many thanks in particular to my tutor Javier Pablo Ainchin Lavin for his kind help and unconditional guidance, in addition to the encouragement and patience I have continually received from him.

I am also grateful to Mr Néstor Rualta, Mr Ignasi Castellví, Mr Antonio Aguado, Mr Gonzalo Ramos, Mr Albert de la Fuente, Mr Florencio Milla, Mr Tomás Arranz and Mr Antonio Canales, who all dedicated time to answer the requested questionnaire, since their knowledge has been an invaluable help in the elaboration of this work.

Last but not least, I would like to thank my family and my partner for the patience they have had with me over the course of these months and for helping me to get along with this work.

ABSTRACT

Risk Management associated to design and construction of TBM tunnel linings with precast segments

Author: Garcia Salvador, Maria

Tutor: Ainchil Lavin, Javier Pablo

Construction of tunnels has much progressed over the last decades regarding methods, technology and materials in both the TBM and the tunnel lining. All construction carries risks, not only during construction but also in operation, which must be considered properly in design and monitored all across the project. Risk management is currently used as a systematic approach to project management. Risk management strategies help to identify and evaluate risks, defining also risk mitigation strategies and even contingency measures if the risks are finally materialized.

Risk management in civil engineering is a work philosophy which has been much developed in recent years. In international projects its use is common, but it is not widely known in our technical environment. The development of the risk management in tunnels has been focused mostly in the risks associated with the excavation of the tunnel, based on the high uncertainties on the ground properties. In others aspects it has been focused on the strong impacts in front of accidents, financial and schedule deviations. With the high development in technology and the improved construction methods, tunnel construction with TBM is able to minimize or mitigate risks, as well as to avoid some of them. It is still needed a comprehensive assessment of all the risks that a project can carry out. Consequently a first review of the state of the art of both risk management and TBM tunnel design and construction is provided.

This thesis focuses in the practical application of risk management approach to a real project tunnel recently constructed in the Middle East with the involvement of several Spanish engineers' experts in the fields of the design and construction of tunnels as well as from the academia. Several meetings took place and a survey template was prepared and submitted to the experts in order to identify risks. After the risk responses, a risk register was created and several systematic analyses were performed. As a result of this necessary analyse, the main risks related to the design and the construction of TBM lining were defined. A second round of discussions with a reduced number of specialists is made in order to obtain feedback and fine tune the final results.

Conclusions obtained refer both to the management of the process and to the risks involved in both the design and construction stages. Given the relevance of the information obtained thanks to the surveys performed, several newlines of work have been detected which refer to critical aspects to be considered in future research.

SUMMARY

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES	10
1.1 Introduction.....	10
1.2 Objectives	11
2. TUNNELS AS AN ENGINEERING PROJECT AND ITS EVOLUTION	13
2.1 Introduction.....	13
2.2 History of the use of lining with precast elements	14
2.3 TBM (Tunnel Boring Machine)	16
2.3.1 TBM in rock	17
2.3.2 TBM in soils	21
2.4 Support of the tunnel with segments of precast reinforced concrete	25
2.5 Trapezoidal ring.....	26
2.6 Tapered ring	27
2.7 Universal ring	29
2.8 Tunnels and Risk Management	32
3. CHARACTERISTICS OF THE TUNNELS EXECUTED WITH TBM.....	33
3.1 Introduction.....	33
3.2 Tunnel linings executed with precast segment.....	33
3.2.1 Precast segments	34
3.3 Interface among segments and ring	39
3.3.1 Interface among segments.....	39
3.3.2 Interface among rings	42
3.3.2 Interface with the ground	44
3.4 Material precast segment	48
3.4.1 Concrete	48
3.4.2 Steel frame	50
3.4.3 Precast fibre reinforced concrete segments for tunnel support	52
3.5 Waterproofing.....	52
3.5.1 Gaskets	54
3.5.2 Packers	55
3.6 Fire resistance	56

3.7 Ring assembly.....	56
3.6.1 Assembling the normal segment.....	57
3.6.2 Assembling the k-segment.....	59
3.6.3 Ring positions	60
4. RISK MANAGEMENT	63
4.1 Definition.....	63
4.2 Project Risk Management	66
4.3 Plan Risk management.....	67
4.3.1 Risk Identification.....	69
4.3.2 Qualitative Risk Analysis.....	70
4.3.3 Risk Quantification	72
4.3.4 Risk Response	74
4.3.5 Control Risk	76
5. RISK MANAGEMENT IN TUNNELS	78
5.1 Introduction.....	78
5.2 Tunnel safety	79
5.3 Code of Practise for Risk Management of tunnel works.....	79
5.4 British Tunnelling Society (BTS) recommendations	80
6. APPLICATION TO A SPECIFIC PROJECT.....	85
6.1 Introduction.....	85
6.2 Interviews	87
6.3 Identify Risks	88
6.4 Qualitative Risk Analysis.....	90
6.5 Quantitative Risk Analysis	93
6.6 Plan Risk Response	96
6.7Contingency Measures.....	101
7. CONCLUSIONS	103
7.1 Introduction.....	103
7.2 Conclusions.....	103
7.3 Future research lines:.....	105
8. BIBLIOGRAPHY	107
8.1 BIBLIOGRAPHY.....	107
9. ANNEX	



9.1 Interviews	
9. 2 Answers	
APPENDIX	

<i>Fig. 2.1 Diagram of the tunnelling shield used to construct the Thames Tunnel</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 2.2 Greathead Shield used in Waterloo and City Railway</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 2.3 Basic type classification of existent TBM</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 2.4 TBM in rock</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 2.5 TBM image for open rock type</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 2.6 Diagram of grippers and advancing cylinders for open TBM</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 2.7 Detail of a gripper in a TBM.....</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 2.8 TBM image for shield rock type</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 2.9 Image of double shield TBM</i>	<i>21</i>
<i>Fig. 2.10 Diagram Slurry Shield</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 2.11 Scheme shield EPB, closed front</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 2.12 Scheme of pressures exerted by the shield on the front.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 2.13 Existing TBM basic types</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 2.14 Scheme of the basic parts of a ring with precast segments</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 2.15 The development Trapezoidal ring with 6 identical trapezoidal segments.....</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 2.16 Tapered ring - Sheppard Subway.....</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 2.17 Example tapered ring</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 2.18 Development universal ring</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 2.19 Use of the universal ring to form straight and curved sections respectively.....</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 2.20 Scheme universal ring where it see the key and counter key opposites (6 precast segments)</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 2.21 Development and the partition of the precast segments of the universal ring in 7 precast segments + 1.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 2.22 Rhomboidal segment with holes for centring cones and bolts in circumferential joints</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 3.1 Integration from segment to lining as a system.....</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 3.2 TBM tunnel lining as a system</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 3.3 Precast segment shape. a) Trapezoidal shape b) Rectangular shape</i>	<i>35</i>
<i>Fig. 3.4 Hexagonal precast segment collocation scheme</i>	<i>36</i>
<i>Fig. 3.5 The universal ring for lining</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 3.6 Universal ring.....</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 3.7 "Relación entre el diámetro interno y el espesor del anillo en 205 túneles. Modificado a partir de Salas y Della Valle (2012)"</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 3.8 Universal ring segments, key segments and counter key segment</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 3.9 Radial and circumferential joint scheme</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 3.10 Guidance rod scheme</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 3.11 Segments with guidance rods and connectors, but without bolts in the joints.....</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 3.12 Placement super-connectors and shearkeys around an opening in the ring.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 3.13 Continuous method injection.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 3.14 Discontinuous method injection</i>	<i>47</i>

<i>Fig. 3.15</i>	<i>Precast segment transport. Herrenknecht-formwork Company</i>	49
<i>Fig. 3.16</i>	<i>Example of steel frame</i>	50
<i>Fig. 3.17</i>	<i>Guidance rod in the precast segment</i>	50
<i>Fig. 3.18</i>	<i>Slenderness relation. Image ITAtech (2016)-Reinforcement a mixed precast segment</i>	51
<i>Fig. 3.19</i>	<i>Seal with hydrophilic inserted (Datwyler)</i>	53
<i>Fig. 3.20</i>	<i>Seal within the concrete (Datwyler)</i>	53
<i>Fig. 3.21</i>	<i>Seal Trelleborg, with a only anchorage to the concrete</i>	54
<i>Fig. 3.22</i>	<i>Example gasket in the precast segment</i>	54
<i>Fig. 3.23</i>	<i>Packer in the joint between rings</i>	55
<i>Fig. 3.24</i>	<i>Concept of heat dissipation</i>	56
<i>Fig. 3.25</i>	<i>Assembling process</i>	57
<i>Fig. 3.26</i>	<i>Need of the trapezoidal segment in presence of connectors</i>	58
<i>Fig. 3.27</i>	<i>Movement of the erector for the placement of the rectangular segment, with two movement</i>	59
<i>Fig. 3.28</i>	<i>Movement of the erector for the placement of the rhomboid segment, with a single movement</i>	59
<i>Fig. 3.29</i>	<i>Radial movement of the k-segment before insertion</i>	60
<i>Fig. 3.30</i>	<i>TBM tunnel not allowed rotations in rectangular precast segment. Cross Joint</i>	61
<i>Fig. 3.31</i>	<i>TBM tunnel not allowed rotations in trapezoidal precast segment. Cross Joint</i>	61
<i>Fig. 3.32</i>	<i>TBM tunnel allowed rotations in rectangular precast segment. Cross Joint</i>	62
<i>Fig. 3.33</i>	<i>TBM tunnel not allowed rotations in trapezoidal precast segment. Cross Joint</i>	62
<i>Fig. 4.1</i>	<i>Project Management Process Group and Knowledge area mapping</i>	64
<i>Fig. 4.2</i>	<i>Mitigation plans process</i>	65
<i>Fig. 4.3</i>	<i>Methodology to clearly identify and manager risks</i>	66
<i>Fig. 4.4</i>	<i>Project Risk Management diagram</i>	67
<i>Fig. 4.5</i>	<i>The risk management framework</i>	68
<i>Fig. 4.6</i>	<i>Risk identification process</i>	69
<i>Fig. 4.7</i>	<i>Qualitative Risk Analysis</i>	71
<i>Fig. 4.8</i>	<i>Risk probabilities and impact diagram</i>	71
<i>Fig. 4.9</i>	<i>Probability and Impact Matrix</i>	72
<i>Fig. 4.10</i>	<i>Risk Quantification process</i>	73
<i>Fig. 4.11</i>	<i>Quantify the probability and impact of risk diagram</i>	73
<i>Fig. 4.12</i>	<i>Risk Response Process</i>	74
<i>Fig. 4.13</i>	<i>Strategies avoid, transfer, accept and mitigate</i>	75
<i>Fig. 4.14</i>	<i>Control Risk process</i>	76
<i>Fig. 4.15</i>	<i>Update the Risk Register Step by Step</i>	76
<i>Fig. 5.1</i>	<i>Prompt list for threat and opportunity identification</i>	82
<i>Fig. 5.2</i>	<i>Tunnel Risk Management Process</i>	83
<i>Fig. 5.3</i>	<i>Risk Register Template</i>	84

<i>Fig. 6 1 Ring cross section.....</i>	<i>86</i>
<i>Fig. 6 2 Integration from Risk Identification.....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 6 3 Integration from Risk Qualitative</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 6 4 Integration from Risk Qualitative</i>	<i>93</i>
<i>Fig. 6 5 Integration from Risk Response.....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 6 6 Three types of level risk</i>	<i>97</i>
<i>Fig. 6 7 Mitigation measures plans</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 6 8</i>	<i>101</i>
<i>Table 6.1 Harmonizing Risk Identification list</i>	<i>90</i>
<i>Table 6.2 Priority Risk Qualitative list</i>	<i>91</i>
<i>Table 6. 3 Impact and probability of success of the assessed risks</i>	<i>93</i>
<i>Table 6. 4 Probability levels.....</i>	<i>94</i>
<i>Table 6. 5 Order of importance of the risks.....</i>	<i>95</i>
<i>Table 6.6 Risk analysis, greatest threat</i>	<i>95</i>
<i>Table 6. 7 Contingency measures.....</i>	<i>101</i>
<i>Table 6. 8 Risk Classification</i>	<i>102</i>

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

1.1 Introduction

Construction of tunnels at global level has much progressed over the last decades regarding methods, technology and materials. It is an infrastructure which adapts well to the needs of communication and transportation while being respectful with the environment. Methods have evolved, since initially manual until mechanical ones. Most common methods in previous times were based on the use of explosives, while the use of Tunnel Boring Machines TBM has steadily increased, particularly in urban environments. In the latter case both the TBM and the lining supporting the ground are two important factors which play a relevant role.

It can be stated that in almost all developed countries there is a clear trend towards underground construction. For example in the case of the metropolitan area of Barcelona, last projects such as the expansion of the metro network and specifically the state of the art driverless Line 9, have encouraged the use of new and increasingly advanced methods, as it is the TBM with its associated lining with concrete precast segment where industrialized construction has been implemented.

This type of construction is characterised by excavating and supporting the ground thanks to the operation of the TBM, while the permanent lining is installed by assembling rings of precast segments as the TBM is progressing.

Work and culture philosophy are important items when deciding how the tunnel and its linings are going to be built, because in some aspects they entrain a different approach from another more classical ones. In the case of geometry for example the change from drill and blast methods to mechanized ones such as that of the TBM has led to modify the typical horseshoed sections to the circular ones mostly adopted in TBM.

This modification has demanded to design a new internal space distribution according to the functionality of the tunnel.

Tunnel construction and underground works involves risks for all relevant parties as well as to other external ones not directly involved in the project.

Traditionally risks have been managed indirectly from the engineering decisions during the project progress.

Risk Management techniques help to identify the potential problems, minimize the risks of them taking place, as well as to define corrective measures when they become events.

Basic principle of this thesis is that any improvement or new advance in the design of the tunnel lining can lead to their risk of construction. Huge collection of information is needed in order to be able to identify the main risks which can be found in the construction tunnel with precast segments. The aim of this work is finally to have main risks identified, probability of occurrence minimized and preventive measures defined a priori in order to manage risks properly .

Thesis is structured in a first part where the Risk Management is explained considering the aspects of tunnel construction as per current state of the art. The process of Risk Management is then implemented applied in a real project by performing identification risks, qualitative and quantitative analysis, and finally defining mitigation plans. Expert judgement technique is the principal tool for this exercise.

1.2 Objectives

Based on a compilation of the existing information and as explained below, the overall goal of the thesis is to be able to identify risks that may take place in real projects, classify them in a qualitative and quantitative way, recommend mitigation strategies and define mitigation plans.

In all projects many questions that may affect a project must be assessed. These questions must be kept in mind considering whether there might be phenomenon's which can affect the project, which probabilities there are that it will happen, how the project if being impacted if the phenomenon's takes place, and which method is necessary to use in order to prevent or minimize the risk impact. All these questions will be put down in order to identify the risks and define how to manage them.

Risks can be known or unknown, negative or positive. A positive risk is also called an opportunity.

There are different strategies in order to manage the risks in the project before they are actually materialized. These are to avoid, to transfer, to mitigate or to accept, and are also called mitigation strategies or mitigation plans, although these wording can create some confusion.

Saying it in other words, the best strategy is in most of the cases to minimize the possibility that the risk occurs by using mitigation strategies or plans. However, if the risk finally materializes, then it is needed to implement contingency plans. Decision must be taken by considering the cost of mitigation and probability of a certain risk in front of the cost of the contingency plans, including schedule costs, fines and intangible costs.

It is always important to have contingency plan prepared in every project, at least for the most relevant ones, and should be compulsory in the case of tunnels and tunnel related ones. For its implementation it is indispensable to know how to carry out appropriate risk assessment and also to develop innovation strategies.

In relation to the specific objectives of the thesis, these are specified below:

- To develop a state of knowledge associated with the technology in the construction tunnels with TBM and the tunnel lining with precast segments in order to understand risks which can be found.
- To present Risk Management and the different analyses included (Identification, Qualitative, Quantitative analyses) and introduce it in our national civil engineering environment.
- Carry out a detailed identification of the risks identified related with TBM linings by requesting the opinion of recognized prestige, and to consult them on the pertinent analyses in order to get relevant feedback.
- To develop recommendations in order to mitigate the risks
- Create conclusions regarding the analysis carried out
- Define new lines of work in order to continue the research

2. TUNNELS AS AN ENGINEERING PROJECT AND ITS EVOLUTION

2.1 Introduction

Tunnel construction has always been present through the history of man, since the first references from the period of Babylonia about 2100 years BC. Nevertheless, it has been from the second half of the nineteenth century with the deployment of the railway systems when there have been a substantial increase in the use of tunnels as appropriate solution for certain infrastructures.

It seems that the use of tunnels as a construction solution will increase, especially in urban areas, due to the existence of safer techniques, as well as substantial advantages in terms of lower effects on the environment and individuals.

Tunnel construction techniques may be classified into two types: hard rock tunnel and soft ground tunnel.

The objective when tunnelling in hard rock ground is to be able to pierce the rock mass in order to remove small pieces of rock, then to unload the material and finally extracting it from the tunnel. Rock is pierced by drilling and blasting, mechanical grinding or manually using hydraulic hammers. In the case of good quality rock, excavation is self-supporting and additional structural lining is not necessary. But practically in almost all of the cases, it is

necessary to provide a tunnel lining, In certain cases the element providing the support is different of the one which constitutes the finishing: while the first resist the ground loads the second ensures an esthetical or even functional mission. When constructing in this type of ground, support is secondary, considering that medium or good rocky ground quality can be practically sustained by itself. Then the principal issue to be addressed is how to excavate in safe and efficient conditions.

In contrast, tunnel excavation in soft ground is normally easier, but the main obstacle is to avoid the ground to collapse. Consequently it is essential to construct a temporary or even permanent support as soon as excavation to be carried out. The tunnel constructed in soft ground usually demands a lining cover support, although in exceptional cases it is not necessary except for durability or other requirements.

Tunnelling and construction of tunnel linings technology has experienced huge progress along the years, as it is presented in the next section.

2.2 History of the use of lining with precast elements

Although lining for tunnels with precast segments seems a recent technique, there were precedents during with the first shields used for underground excavation in London during XIX century.

Excavation in that case was planned considering three main requirements:

- First of all, to provide a support system during excavation process and thereby temporary protect workers at the front during both the excavation and lining construction.
- Secondly, this system must permit to construct a complete section from start to finish in complete section. In the traditional method pilot tunnel was drilled and after that excavation extended.
- Achieve control system and excluded water from the works while the construction is being done.

To provide a solution to the requirements above, innovation was necessary since the available materials for tunnel linings were bricks or masonry blocks. The first tunnel to demonstrate the use of shield and lining with masonry bricks was Rotherhithe tunnel. It was the first tunnel under the River Thames (London, England) as can be seen in Figure 2.1. The tunnel was constructed by Marc Brunel between 1825 and 1841.

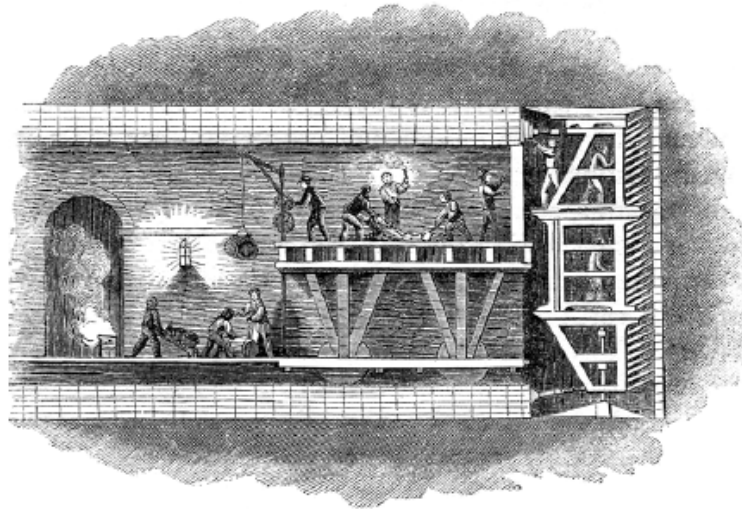


Fig. 2.1 Diagram of the tunnelling shield used to construct the Thames Tunnel

As the techniques and methods of tunnelling progressed, the tunnel lining follows this trend. Altogether these actions permitted to build tunnels on more difficult ground. The initial design by Brunel was substantially improved by Peter Barlow during the Tower Subway construction below the River Thames in 1870. Years later, Barlow design was also improved by James Greathead in the City and South London Railway construction.

Therefore, Peter Barlow and James Greathead were pioneering in the use of the shield and lining with precast segments, but concrete was not already in use for this application. Greathead Shield (Fig. 2.2) was designed as a protection for the workers who excavated and moved the shield forward, and then progressively all tunnel wall sections were built.

This shield used also for the second Thames tunnel, for the Waterloo and City Railway (1898) was so successful, that its design remained, unchanged, for almost 75 years.

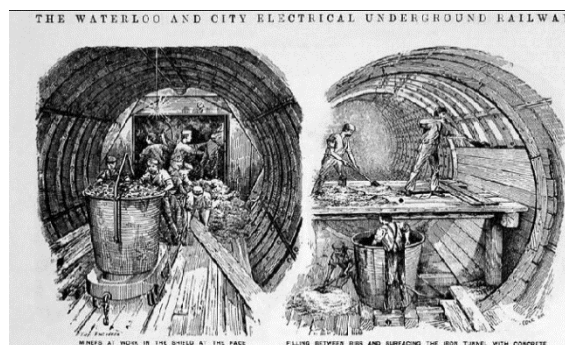


Fig. 2.2 Greathead Shield used in Waterloo and City

The use of shield allowed the construction of the lining with segments in iron instead of bricks as a support system, in order to improve the efficiency in later projects. The elements were bolted one to the other instead of binding bricks with mortar. These structures were very successful and consequently implemented in the great majority London Underground lines between 1854 and 1906.

2.3 TBM (Tunnel Boring Machine)

In the last years, TBM has become the most used method for the construction of tunnels in urban areas. TBM is a machine capable to excavate tunnels in full section and at the same time, if necessary, it contributes to place a support, either in a provisional or definitive form. The excavation is carried out with a rotating head provided with cutting elements and driven by a hydraulic motor.

The progress of the TBM is achieved with a cutting wheel located in the front of the shield, which is driven by hydraulic jacks. Pressure in the front of the excavation is provided through the cutting wheel to the ground, and is being transmitted by the hydraulic jacks that stand on the lateral side of the lining. This system is complemented by the control of the material amount which is extracted from the cutting chamber, by acting on the velocity of the extraction Arquimedess crew. As TBM progresses, the precast segment are placed forming the lining. The gap between ground and lining extrados is injected in order to prevent ground movements.

On the back of the shield it is located what is called backup or service train formed for a series of towed platforms to the machine itself. It is used for supporting activities and lodge several equipment such as: transformers, cables, ventilation fans, mortar injection pumps, evacuation of materials systems, and other auxiliary systems for the functioning of the TBM, as well as the services and protection means of the workers.

Below a classification of the TBM is shown which is divided in two groups depending on the ground type (Fig. 2.3). TBM is used both for rocks and soils, however in the case of rocks sometimes the shield is not necessary. Each one of them have specific characteristics in where is specified the necessities of the lining for every ground type.

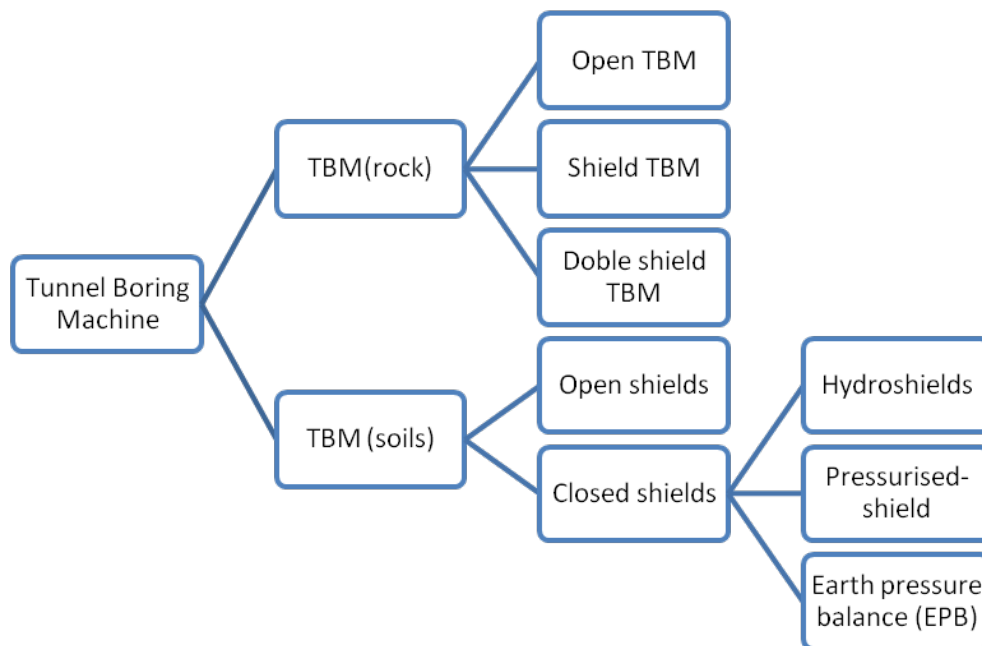


Fig. 2.3 Basic type classification of existent TBM

2.3.1 TBM in rock

In general, the TBM for rocks conditions (Fig.2.4) are designed to excavate hard and medium rocks, without much necessity of support. However, there is a trend to display shields even in rock conditions due to the lack of comprehensive knowledge of the ground. The pushing force is transmitted in the cutting head of the TBM by means of advancing cylinders. But in this case the reaction is provided by side elements called grippers which push the ground in radial direction. Friction mechanisms ensure proper reaction in order the TBM to progress forward. Problems arise when the ground is not strong enough to support radial forces and collapses. For this reason it is more and more frequent nowadays to remove the grippers and use the system of shield supported on the lining previously constructed as in the case of soft ground which will be explained later.

In certain cases both support systems by using grippers or constructed lining ones are integrated, and this TBMs are called Double Shields.



Fig. 2.4 TBM in rock

TBM can be classified as follows:

a. Open TBM

In order to progress, rock TBM typically obtains the necessary support force from the grippers, combined with the action of the cutting discs which breaks the rock in the front part (Fig. 2.5). It is especially used in rocky massifs of good mechanical quality, as open TBM provide better excavation efficiency in this sort of geology. The advancing velocity will depend on the quantity of support to install right behind of the cutting wheel.



Fig. 2.5 TBM image for open rock type

- i. Grippers: they are hydraulic devices which secure with an elbow-shaped form the TBM against the rock while advancing, being their surface bigger when smaller is the resistance of the rock. Generally, the grippers are at most 0.7m wide, so that they would be able to lean on the trusses. (Fig. 2.6 and Fig. 2.7)
- ii. Advancing cylinders: they are normally two or three and they provide to the TBM the necessary force against the front to carry out the excavation. (Fig. 2.6). Its length is between 1.5 and 2.0m and they fix the cycle advancing length, since each time the TBM is advancing the grippers are released and the advancing cylinders are retracted.

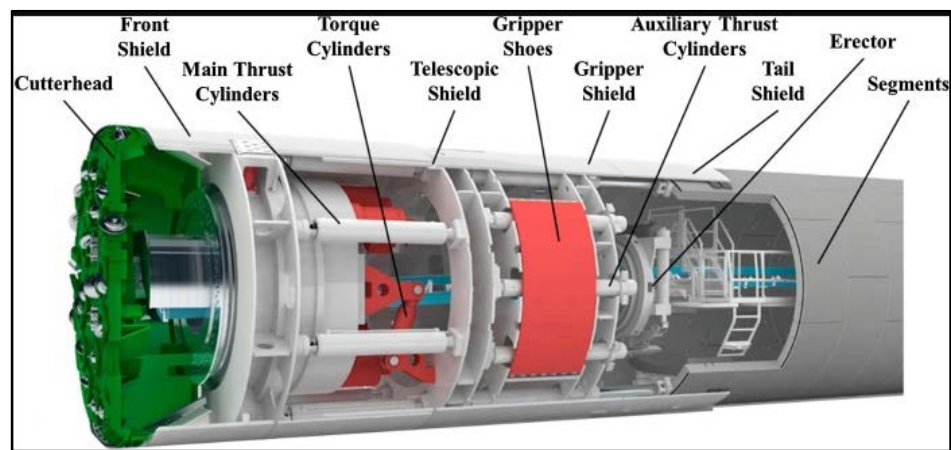


Fig. 2.6 Diagram of grippers and advancing cylinders for open TBM



Fig. 2.7 Detail of a gripper in a TBM

b. Shield TBM

Its application field is bigger as it is used for rocks between medium and low quality, where grippers are not as effective and it is needed a lining of precast segments to lean on to be able to advance (Fig. 2.8).



Fig. 2.8 TBM image for shield rock type

c. Double shield TBM

This methodology is able to work as in rock conditions but implementing also shield, in function of the quality of the rocky massifs, being this one the best solution for the massifs with frames of variable typology soil-rock (Fig. 2.9). In this TBM type the shield is divided in two parts, the front part where the cutting head is located and, the back part where is carried out the setup of the ring of the precast segments.

The movement of these two parts of the shield is independent, placing the grippers in an open hole between them, so that the cutting head is able to excavate while the tail of the shield is setting up the rings of the precast segments. This way, the achieved effectiveness with the system is higher than with the simple shield. However, costs of fabrication are much higher because of the two systems which have to be installed.

When the ground is capable to resist both the pressure that the grippers transmit and the pushing force of the cylinders, the TBM works will all grounds type. However, if the ground is weaker and is not capable to resist the pressure of the grippers, the TBM will work as a simple shield, closing the holes of the grippers and leaning in the machine by auxiliary cylinders acting to the last positioned ring in order to obtain the necessary relation of pushing force of the cutting head, in order words, working now as a simple shield. This last situation is similar to that of soft ground.



Fig. 2.9 Image of double shield TBM

2.3.2 TBM in soils

They are machines designed to excavate the soft rocks and soils, grounds which need systematically the support. The shields are made of an exterior metallic shell holding provisionally the ground from the advancing front to a bit more than where the definitive support is set up by the precast fragments. Frequently, they are capable to work under the phreatic level. They lean on directly over the final support and after each advancing step the hydraulic jacks retract to permit the placing of the next ring.

It is distinguished several types of shields depending on the front subsection type which are shown below.

- **Open front shields**

They are used when the front of the tunnel is stable. The excavation system can be manual with milling arm, with an excavation arm or with a rotation head. If the head is not rotational with this type of machine, it is possible to work with non-circular sections.

- **Closed front shields**

They are used when the front of the tunnel is markedly instable, for example in grounds with no cohesive soil or saturated, and even mixed soil conditions.

The closed front shields are classified as following:

a. Hydro shields (Slurry Shields)

The hydro shields, also known as bentonite shields or Slurry Shields, employ sludge to guarantee the stability of the front, making the equipment adequate to work in grounds composed of sand, gravel and other soft materials which are under water pressure. The sludge injection stabilises the ground and contributes to the pumping of excavation materials. The disadvantage is the large treatment plants that are needed to separate the fine sediments and the sludge, but are compulsory in certain areas where settlements must be avoided at a maximum (Fig. 2.10).

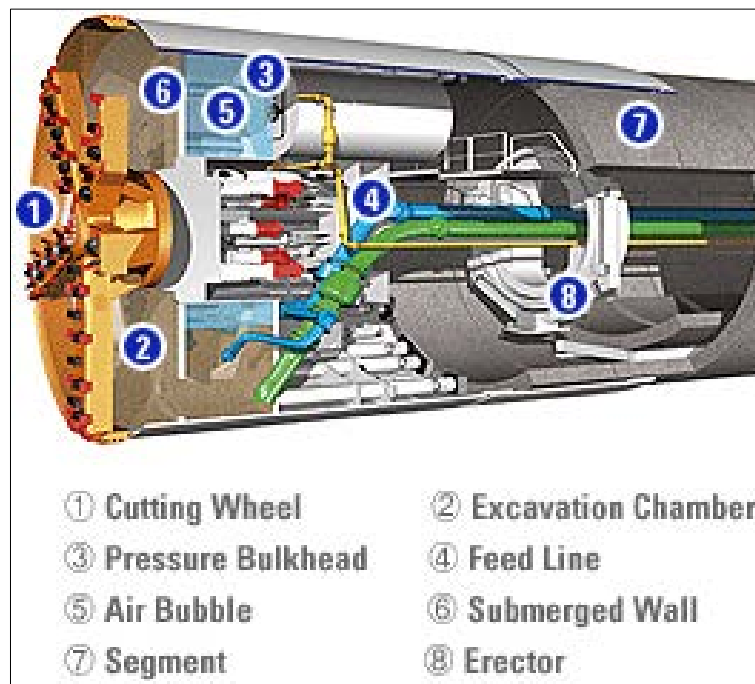


Fig. 2.10 Diagram Slurry Shield

b. Pressurised-shield

The pressurised-shield with compressed air was normally used in tunnels build under the phreatic level of minor importance, so that the existent pressure between the steel lock and the tunnel front would slightly exceed the load associated to the water-ground group. They allowed them to use simple shield since it might only require that the ground would show low permeability under air pass, even though any loss of air could have become an enormous disaster, and that is why nowadays they are practically abandoned.

Therefore, at present, the main importance is seeking to control the chamber pressure, letting work in the rest of tunnel in ordinary pressure conditions. They are seldom being used because of health and safety requirements.

c. Earth Pressure Balance (EPB)

The earth pressure balance (EPB) system constitutes the dominant technology and they are used in practise in a wide range of grounds which are characterised for their instability, being appropriate to a great deal of soils from clay, sand, silt or with gravel (Fig. 2.11). It combines some aspects from both the hydro shield and the pressurised-shield with compressed air, besides being the dominant technology in excavation of tunnels in under phreatic level soils. There also special TBMs such as the one used in the Can Zam section of Line 9 Metro in Barcelona, which was an EPB with a cutter head suitable for rock excavation, in order to work in mixed ground conditions.

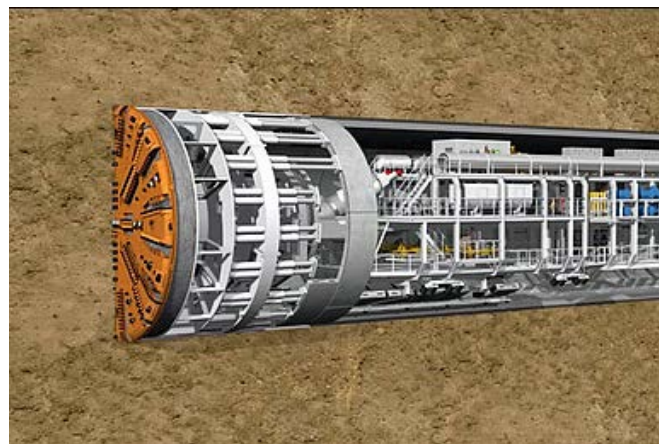


Fig. 2.11 Scheme shield EPB, closed front

Its functioning is based in using the same excavated material to refill the excavated chamber to provide in this way the necessary sustainment of the front. The displaced debris of the cutting head goes to chamber right behind, and it is compressed as it is filling up, in a way that the balance is achieved to maintain the pressure (Fig.2.12).

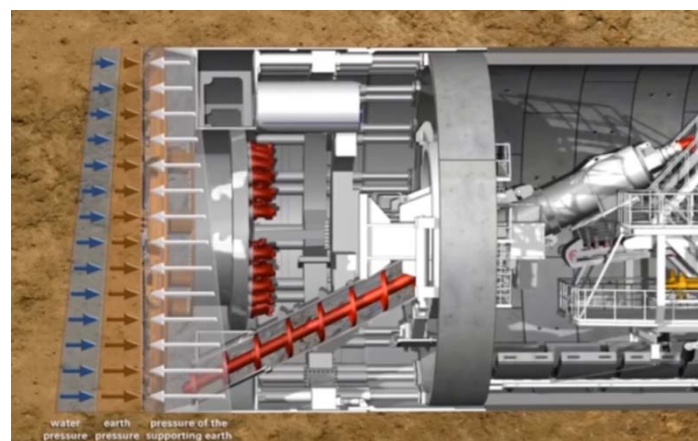


Fig. 2.12 Scheme of pressures exerted by the shield on the front

The aim of this type of machine is to achieve a plastic and viscous mixture that will satisfy certain requirements of impermeability and controlled transmission of the pressure in all the tunnel section. To that end, it is used water injections, foams, moods and polymers in the cutting wheel.

It is important to control de volume of displayed debris in the Arquimedes bolt to control the equilibrium system by ground pressure. This equilibrium is achieved maintaining constant the bolt velocity relating to the ground pressure inside the chamber. Such a pressure is initially established as a function of the ground type and the corresponding load of water.

In overview mode, the following table is attached with the TBM characteristics (Fig. 2.13):

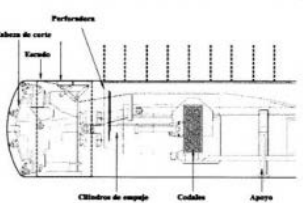

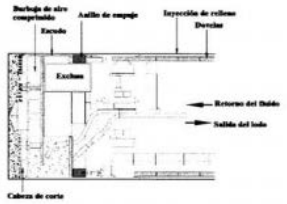
TIPO	ESQUEMA	PRINCIPIO DE EXCAVACIÓN	ASPECTO DEL TERRENO EXCAVADO	MEDIO DE CARGA	TRANSPORTE PRIMARIO	DESTINO DEL ESCOMBRO	PRINCIPAL CONSUMO DE POTENCIA	SOSTENIMIENTO	REVESTIMIENTO	TERRENO IDEAL DE APLICACIÓN
T.B.M.		DISCOS CORTADORES EMPUJADOS CONTRA EL FRETE	LAJAS CENTRIMÉTRICAS	CARGONES	CINTA AXIAL	ESCOBRERA	EMPULAR LOS CORTADORES	CERCHAS — BULONES — HORMIGÓN PROYECTADO	LA PROPIA ROCA — HORMIGÓN PROYECTADO — HORMIGÓN ENCOFRADO	MACIZOS ROCOSOS DE RESISTENCIA MEDIA A ELEVADA
E. P. B. E S C U D O H Y D R O S		CINCELES QUE GIRAN CONTRA EL TERRENO	MASA GRANULAR DE CONSISTENCIA PLÁSTICA	TORNILLO DE ARQUÍMEDES	CINTAS	ESCOBRERA	AMASAR EL TERRENO	EL PROPIO ESCUDO DE LA MÁQUINA	DOVELAS	SUELOS COHESIVOS Y ROCAS BLANDAS
		CINCELES QUE GIRAN CONTRA EL TERRENO	GRÁNULOS EN SUSPENSIÓN ACUOSA	BOMBA DE LODOS	BOMBA DE LODOS	PLANTA DE SEPARACIÓN	BOMBLEAR LODOS	EL PROPIO ESCUDO DE LA MÁQUINA	DOVELAS	SUELOS GRANULARES

Fig. 2.13 Existing TBM basic types

2.4 Support of the tunnel with segments of precast reinforced concrete

From the decade of 1960, the concrete supports have been used in many small diameter tunnels in Europe. The supports were designed to be hand-build, consequently, the width of the precast segment was restricted for its weight, and width was around 600mm. Those precast segments generally formed the primary support, and later a second one consisted of concrete panels or filled in situ was built. [Skelhorn, McNally. 2009]

The dimensions and characteristics of the precast segments will depend in factors as: the ground conditions, the free space to place and transport them, the maximum extension available of the hydraulic jacks... As a general rule, the precast segments are done as much larger as possible, so that to have the less quantity of them in a ring, facilitating the TBM work.

There are two types of support, the primary and the secondary support.

- Primary support: the aim is to provide a temporary or definitive support and to guarantee the stability of the tunnel in construction, maintaining the superficial settlements in the tolerable limits.
- Secondary support: the aim is to provide the long-term corresponding performance of the tunnel. It is set up months later of placing the primary support. It consists in placing concrete on the precast reinforced segments, being able to have the same compression resistance and geometric characteristics of the primary support.

At present, the precast segments are extensively used as primary supports in tunnels build with TBM in soft soils. Precast segment provides at a time good support conditions while finishes can be outstanding. As TBM excavates and advances, it places the group of precast segments which form the primary supporting the final position. The precast segments are placed in a cone-shaped ring, which means, in the shape of a cone truncated by two planes not perfectly parallel.

With the development of more advanced TBMs, precast segments erectors were implemented which eliminated the restrictions of the size associated to the weight of the precast segments. This advance allowed to move from a layered construction to just a single ring as final support, being able to build in a single pass.

The excavation shield installs in an automatized and precise way the group of precast segments, forming rings. The erector of the precast segments is in charge of placing the precast segments in the final position. It is first positioned in the counter key, then after placing in the lateral of this segment the other precast segments, ending up the ring with the last piece called key segment. The key segment is the piece with smaller size with a different geometry from the others, and, it is the last one to place when building the ring, thus forming a succession of rings. [Gutiérrez. 2010]. In the figure 2.14, it is shown in a schematic way a ring composed for precast segments and their basics parts.

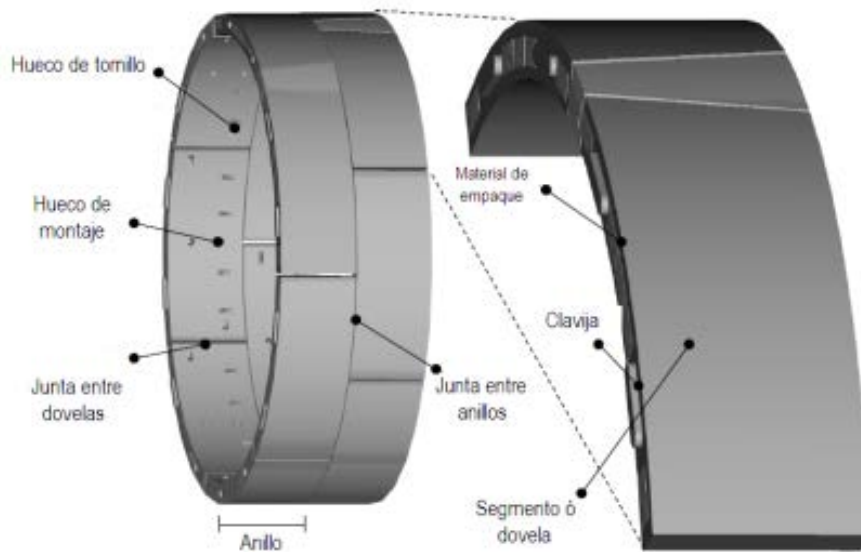


Fig. 2.14 Scheme of the basic parts of a ring with precast segments

Waterproofing is a key issue in this kind of tunnels, since it is difficult to achieve effectively seals between precast segments. In the first constructed tunnels a rope coated with tar was placed between every precast segment to temporarily seal the joints and, to retain the cement grout of the partial filling. The joints between the segments were sealed later with mortar or similar after the finalisation of the tunnel, which made the construction of the project slow. Over time, the rope was replaced for permanent hydrophilic joints, which were installed in a slot of the precast segment which was made for that purpose. This new method had proved successful in the end, even though many clients kept using the old sealing methods with mortar. [Skelhorn, McNally. 2009]. Current state of the art solution is to place rubber or elastomeric gaskets which work under pressure and ensure waterproofing. There are still however several issues pending, such as the behaviour of gaskets in the crossed joints, the loss of compression along the tunnel due to creeping effect and the damages during assembly. In certain cases a double gasket systems is installed.

2.5 Trapezoidal ring

In the early 1980s, designers and contractors began to experiment with trapezoidal segments. The change was driven by the need to improve water tightness of the lining system, and the substitution of rubber gaskets for previously used hydrophilic gaskets. With a rubber gasket, there was a need to slide each segment into place before contact was made with between gaskets. This was not possible with parallel segments, where it was necessary for the TBM erector to compress the radial gaskets to align the bolt holes. With trapezoidal segments, the gasket does not make contact until the segment bolts holes are aligned. [Skelhorn, McNally. 2009]

The initial trapezoidal ring consisted of 6 identical trapezoidal segments. These could essentially be thought of as three keys and three counter keys (Fig. 15). Starting with a counter key segment, the build sequence required a “key” segment to be built on either side of the key before installing the other two counter keys. This resulted in difficulty compressing all the gaskets and ensuring water tightness of the liner.

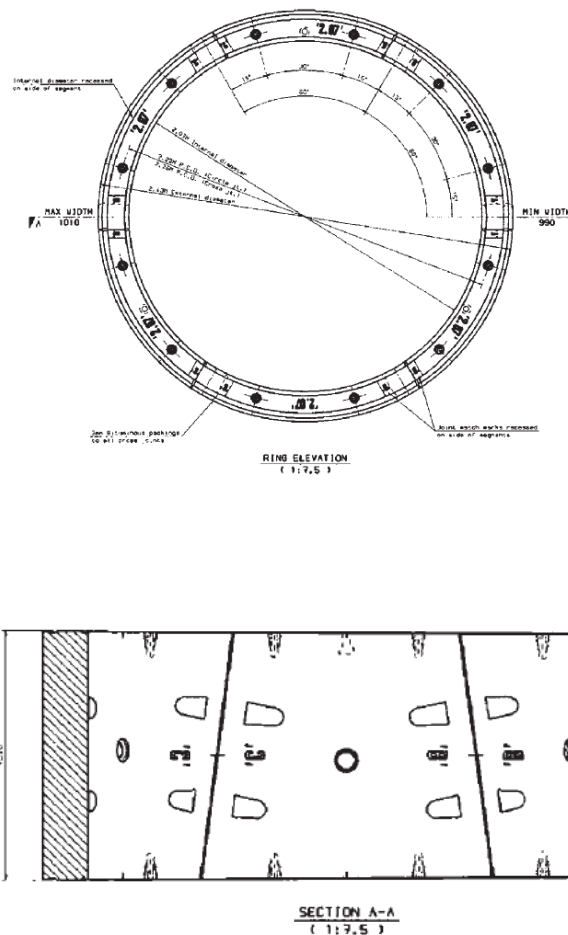


Fig. 2.15 The development Trapezoidal ring with 6 identical trapezoidal segments

2.6 Tapered ring

One of the issues with any segmental ring is negotiating curves. With a non tapered ring, it was necessary to pack the longitudinal joints (Fig. 2.16). This would accommodate curves in the tunnel; however it created ring build quality problems. When a parallel ring is packed on one edge, the ring loses its plane. Within a segmental ring, this causes a geometrical shift and the ring loses its circularity. This in turn makes it harder to build subsequent rings. To counteract this, extensive surveys and checks were required to the liners during and after construction to allow appropriate adjustments through packing of the rings. [Skelhorn, McNally. 2009]



Fig. 2.16 Tapered ring - Sheppard Subway

The tapered ring was developed using a standard ring with a single key, and introducing a taper to the ring width. Tapers varied but were generally between 10 and 20 mm. A nominal 1m wide ring with a 20 mm taper would therefore consist of segments ranging in width from 990 mm to 1010 mm; fundamentally, the tunnel could now be steered by pointing the ring (directing the taper) in the desired direction, while maintaining the plane of the rings. [Skelhorn, McNally. 2009] (Fig 2.17)



Fig. 2.17 Example tapered ring

With a tapered ring, the geometry of each individual segment is different, so requires use complexity castings for each individual segment. At a certain point trapezoidal ring mitigates this issue because this ring consists of three pairs of identical segments.

Ring building typically starts with a segment in the invert usually called counter key and ends with the final key placed at the selected position. Tapered ring required alignment of the taper is determined at the end of each mining cycle by measuring the gap between the last ring built

and TBM. It is not possible to determine the orientation until the TBM has completed mining, as it is dependent on steering of the TBM. [Skelhorn, McNally. 2009]

A key issue with restricting placement of the key segment to above spring line is the impact on delivery of segments to the TBM. This is a great issue with small diameter tunnels. In many cases is not practical to make adjustments during the operation without causing delays.

2.7 Universal ring

The most frequent ring is universal ring, result of the cutting of a theoretical cylinder (Fig. 2.18) by two plans, one normal to the axis and other slightly inclined. Depending on angle between the two cut plans, ring have a variable length around its perimeter. [Bofill de la Cierva. 2007]. This ring generally consist of two trapezoidal key segments (key and counter key) and a number of rhomboid side segments (normally between 4 and 6) to make the full ring. (Fig. 2.19)

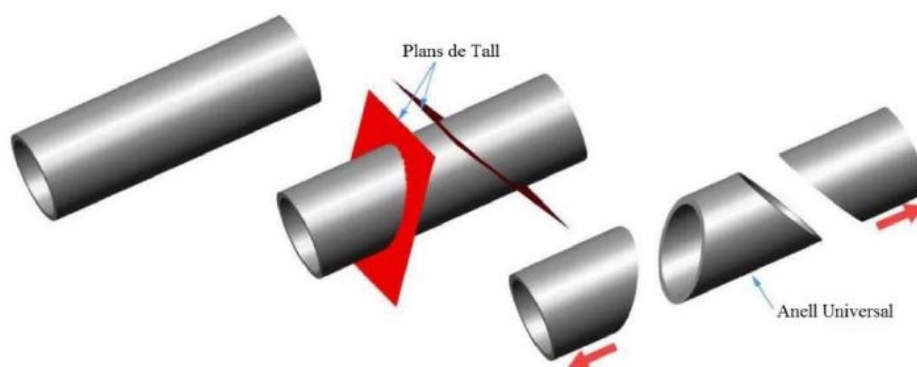


Fig. 2.18 Development universal ring

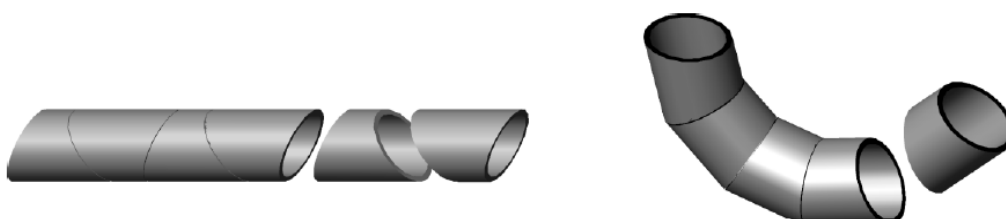


Fig. 2.19 Use of the universal ring to form straight and curved sections respectively

The configuration of the ring does not change, what is modified is the thrust plane allowing the shield the choice of the most appropriate ring according to a given sequence choosing some of the most appropriate combinations according to the trajectory of the TBM.

Therefore, the usual configuration is that the key and counter key are placed facing the ring, that is, 180 degrees. The assembly of the ring starts with the placement of the counter key, continues with the placement of two (o three, depending on the design) rhomboidal segments on each side and ends with the key placement.[Cavalaro.2009](Fig. 2.20)

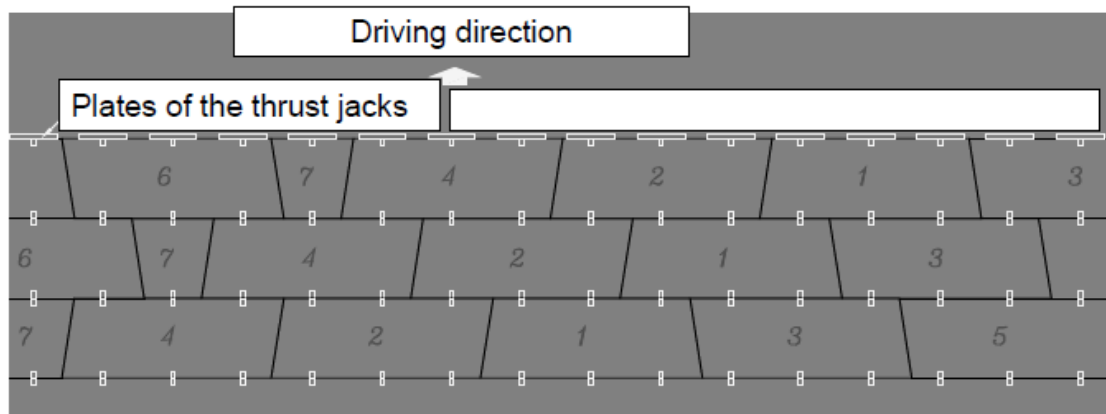


Fig. 2.20 Scheme universal ring where it see the key and counter key opposites (6 precast segments)

Some projects have been carried out with the two keys adjacent to one another in the ring; however, this configuration restricts the building process to one direction only. In this case, ring building must start with the counter key, and work sequentially around the circle, ending with the key. For a ring design with the key to the right of counter key, the build will always need to be carried out in a counter clockwise direction. A consequence of this approach is that, with the erector always acting on the same direction, it can introduce a roll to the tunnel.[Skelhorn, McNally. 2009]

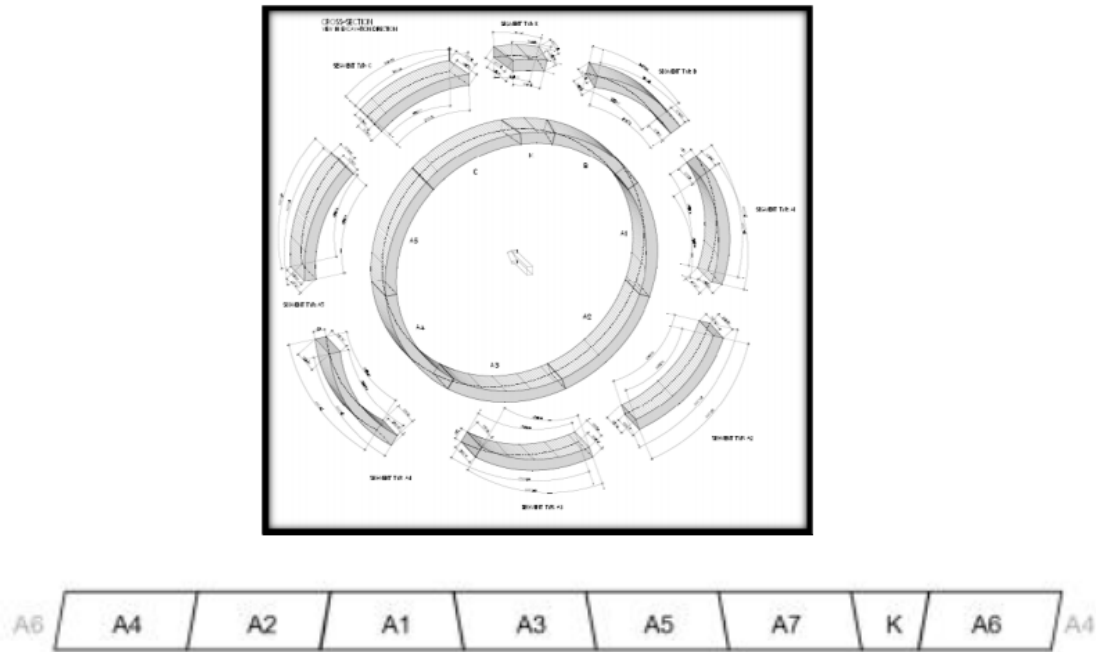


Fig. 2.21 Development and the partition of the precast segments of the universal ring in 7 precast segments + 1

A universal ring has the great advantage that the build process always starts with the same segment (the counter key) for all rings. Depending upon the required orientation of the ring taper, this segment may be built anywhere around the circle. Taking advantage of this factor, it has been possible to reduce the key size, which increases ease of construction (Fig. 2.21). It also reduces the recoil distance (clearance) required and consequently reduces TBM ram stroke and tail can length. [Skelhorn, McNally. 2009]

Implementation of this type of rings has led to replaced the old bolts with straight spear bolts that screw in to cast in plastic inserts and have introduced the option of using dowels for longitudinal joints. This has also introduced the option of using dowels for longitudinal joints. These changes have greatly improved the build quality and ease of construction of the liner (Fig. 2.22).

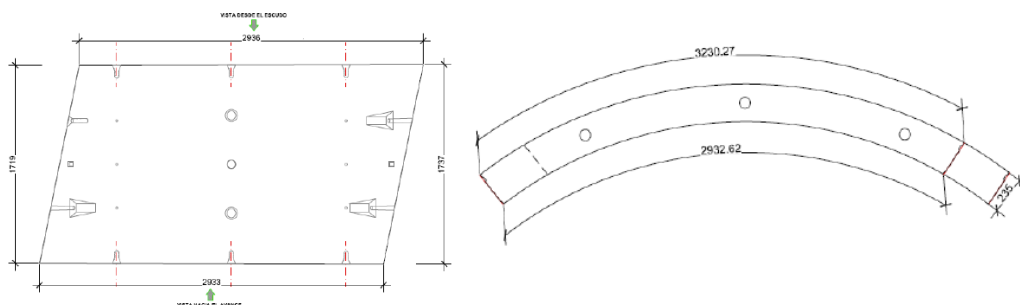


Fig. 2.22 Rhomboidal segment with holes for centring cones and bolts in circumferential joints

2.8 Tunnels and Risk Management

As it has been already explained during this section, development of new tunneling methods as well as more efficient lining design has been triggered in the last decades. Main reason of this is the fact that tunnel construction is historically deeply related with risks, understood as events that can impact a certain project

Main risks associated with tunnel construction come from the following facts:

- Ground uncertainty: physical space where the tunnel has to be dug is mostly unknown. Superficial data acquisition is not enough in an environment that can change frequently. Drilling samples is expensive and time consuming. Indirect techniques are in several cases not reliable.
- Unsafe conditions: digging a tunnel means removing material which is supporting ground above and has to be performed in a very short period in order to avoid collapses.
- Confined spaces: tunnels under construction or even in operation are confined areas with not clear escape, lack of natural ventilation of light.
- Strong investments: tunnels are expensive infrastructures which must have enough finance resources available, and frequently demand public support.

As per these facts, main risks can be summarized in:

- Risk of accidents during construction, due to collapses, use of explosives, workers hit by equipment, suffocations, electrocutions, unexpected water flooding, among others.
- Risks of financial deviations, due to unexpected more complex geological conditions, corrective measures in the case of impacts to the environment and compensations in case of accidents.
- Risk of schedule deviations related with accidents or unexpected issues, which impact third parties. In some extreme cases tunnels have been even abandoned without being completed, causing serious problems to the society as whole.

There have been several attempts to tackle risks in tunnels in the recent times. BTS British Tunneling Society worked with the Association of British Insurers (ABI) in order to produce a Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK (2003 last edition). Later on the International Tunnel Insurance Group (ITIG) and the International Tunneling Association (ITA) prepared the Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works (2012). Related with several serious accidents related with tunnels in operation, European Union issued Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for road tunnels in the trans-European road network.

While excavation risks associated with tunneling are in most of the cases adequately managed thanks to the use of TBM, this present study will focus in the design and construction of the lining which is at the same time the support and the finishing of the tunnel.

3. CHARACTERISTICS OF THE TUNNELS EXECUTED WITH TBM

3.1 Introduction

One of the most common methods in recent years for the construction of tunnels is the use of Tunnel Boring Machine TBM. This technique allows excavating the tunnel, while a lining formed by precast segments is placed. By this way it is possible to construct underground works with very little impact in buildings or traffic flow at ground level.

In this chapter we will focus on the description of the TBM method. We will detail the aspects defined in the design, such as the geometry, the material and the lining with precast segment.

3.2 Tunnel linings executed with precast segment

Tunnel linings constructed by TBM using precast segments can be considered as a system composed of individual elements. These elements called precast segments constitute both the support and in most of the cases also the final lining of the tunnel itself. Precast segments are linked together in order to form a ring and later on rings are assembled giving place to a complete tunnel section. All the integrated system finally ensures that adequate support is properly given in front of the different ground and internal conditions.

The evolution from the individual element in order to create the final section is shown by the following stages (Fig. 3.1):

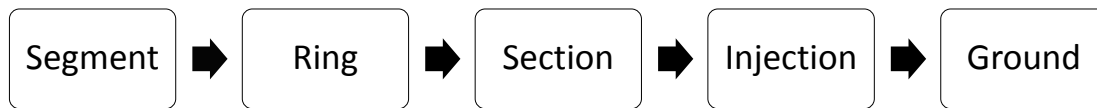


Fig. 3.1 Integration from segment to lining as a system

Fig. 3.1

Figure 3.2 TBM tunnel lining as a system can be seen how segments are combined to create finally the tunnel section.

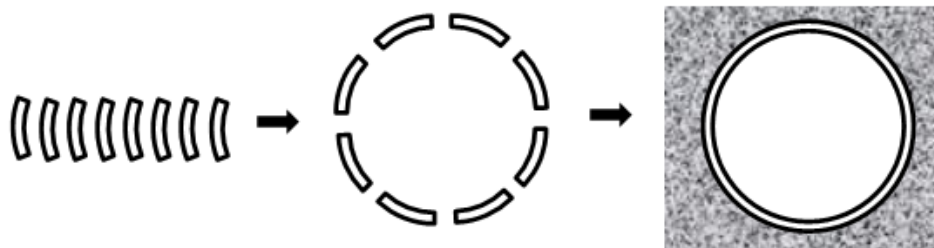


Fig. 3.2 TBM tunnel lining as a system

3.2.1 Precast segments

Precast segments are curved shaped reinforced concrete slabs that once assembled create a ring of a desired internal diameter. The successive rings give place to a cylindrical element starting from which the lining is constructed.

The most relevant aspects into account in the tunnel linings are: [Pescara.2010]

- A. The geometry (general and detailed) of the chosen segmental lining
 - **Segments:** rectangular, trapezoidal and honeycomb
 - **Rings:** straight, right/left and universal
- B. The actions undertaken by the single segment and by the full ring all along their life
 - **On one single segment:** pre-cast process, handling, storage, assembling to constitute a ring
 - **On the ring:** TBM drive/tunnel excavation, tail void injections, "ground" loads
- C. The characteristics of the materials constituting the various parts

- Concrete, steel, steel fibre, connectors-bolts (plastic and/or steel made), gaskets for the waterproofing (rubber and/or swelling material)

D. The norms and standards to be applied

- State and Europe standards, recommendations provided by AFTES, ITA...

The segmental lining is used to satisfy construction and/or environmental requests, which the main can be chosen in a combination of the following points: [Pescara.2010]

- Need for an immediate support, mainly for excavation in an instable ground
- Need to control carefully the movements induced by the tunnel excavation
- To avoid the drainage of the ground water and therefore to build a waterproof tunnel
- Provide the contrast reaction for the TBM advance
- To avoid the installation of a secondary lining
-

The objective of this chapter is to develop the necessary knowledge for the selection and sizing of precast elements for tunnel lining. For this reason the following considerations will be taken into account:

3.2.1.1 Geometry and precast segment shape

Within the big diameter tunnels for road and train purposes, the underused circular bored space has become more relevant. In order to take most of the circular geometry and, in many cases to fulfil safety requirements to accomplish increasingly strict regulations, segment sizes are chosen as big as possible, so the number of segments lessens and therefore, the tunnel machine works speed up.

- Precast segment

Nowadays, the most used rings are rectangular trapezoidal shaped, with a closure segment or key always trapezoidal, as shown in the following figures 3.3.

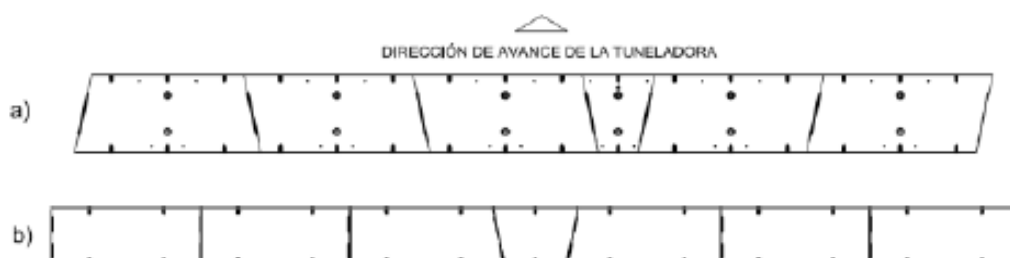


Fig. 3.3 Precast segment shape. a) Trapezoidal shape b) Rectangular shape

Rings with all their trapezoidal segments have advantages of a faster placement and a lack of bolts, since segments fit in each other. Moreover, as a result of the reduced contact in the installation phase between perimeter stamps, a better sealing is achieved.

Covering with trapezoidal segments have been used for small diameter tunnels since 1990 [Angerer.2008]. They present advantages such that a better joint convenience, a reduction in the number of crossed or star connections, and accuracy at the covering placing. In recent years, this type is being implemented successfully in almost all diameters, for the explained reasons.

Rings with hexagonal segments (Fig. 3.4) and parallel faces are rarely used, and practically limiting to small diameter tunnels. Installation tolerances in this kind of rings do not allow, in most cases, a proper joint closure between rings, causing unacceptable imperfections.

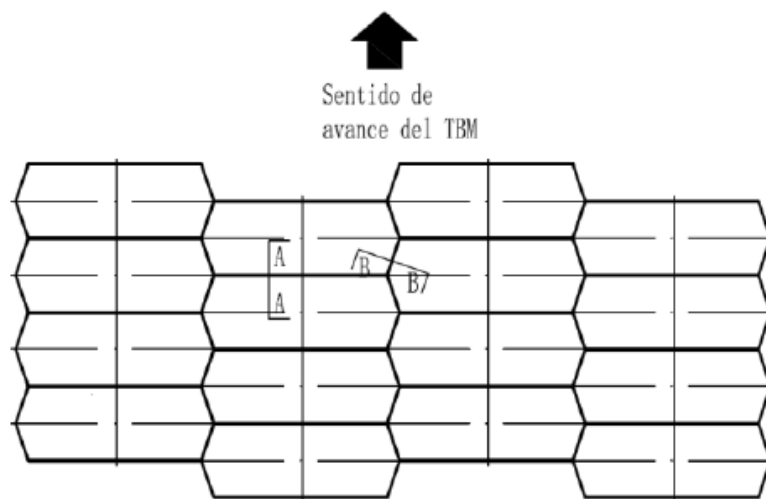


Fig. 3.4 Hexagonal precast segment collocation scheme

- **Ring**

Almost all works systematically use the universal ring for lining (Fig. 3.5), with cone based shape in accordance to the maximum radius layout and enough to correct guiding shield irregularities [Della Valle, Castellví.2016].

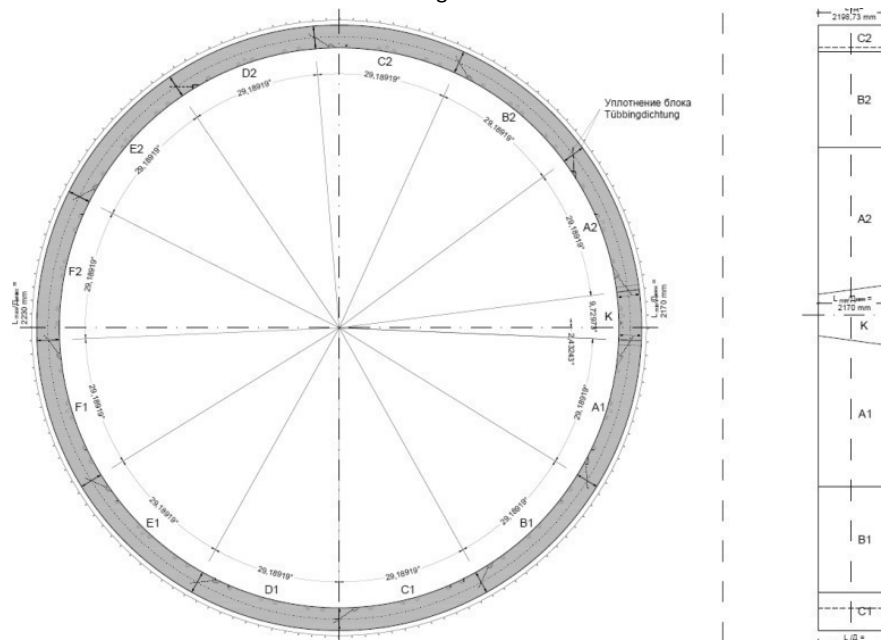


Fig. 3.5 The universal ring for lining

Universal ring is obtained as a result of cutting a theoretical cylinder from its two planes, both slightly inclined. If both planes are symmetric to one perpendicular to the axis, then, the ring is called universal conical ring.

In the case of one exactly perpendicular and the other slightly oblique, the ring is denominated right or left conical trapezoidal [AFTES. 1997]. Consecutive connection between rings is called circumferential connection. (Fig. 3.6).

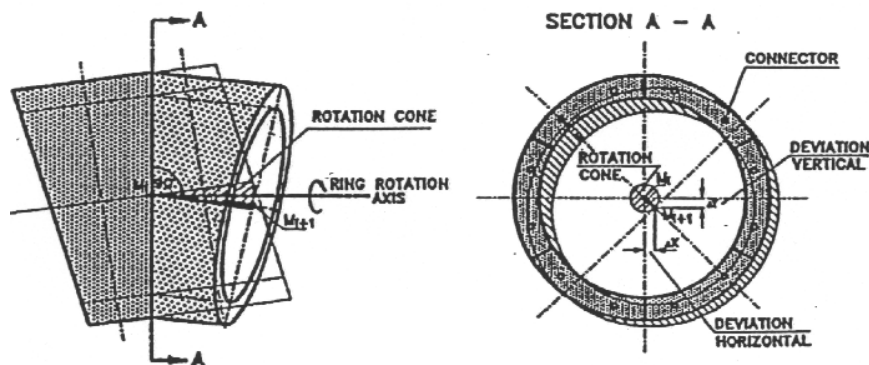


Fig. 3.6 Universal ring

Talking about the family of universal rings, it can be differentiated right or left rings. Their symmetric geometry allows placing the closure key (the last segment to be installed) always in the middle above the tunnel. There is no technique reason in this type of system. If a strict monitoring is required, some delays can be occurred (bigger logistic complexity) or quality problems for having forced the key into inappropriate positions. In some works, it is omitted, and it is worked as normal universal ring.

The type of segment, as well as the type of ring, finally depends on the working philosophy of each country and each construction company.

3.2.1.2 Ring thickness with precast segments

Over time, the segment ring thickness topic has been discussed, and there is still no definite general rule. Hereafter, it can be observed different selection criteria related to segment ring thickness, considering the type of soil and the depth, among other things.

From a structural point of view, usual values range from 3.5 to 4.5% of the tunnel diameter, tending to be taller for small tunnel diameters, and even reaching ratios of 5.5 – 6% (Fig. 3.7).

Furthermore, in some specific situations, where the fire aggressiveness or resistance relies on a particular relevance, these ratios could be higher [Salas y Della Valle, 2012].

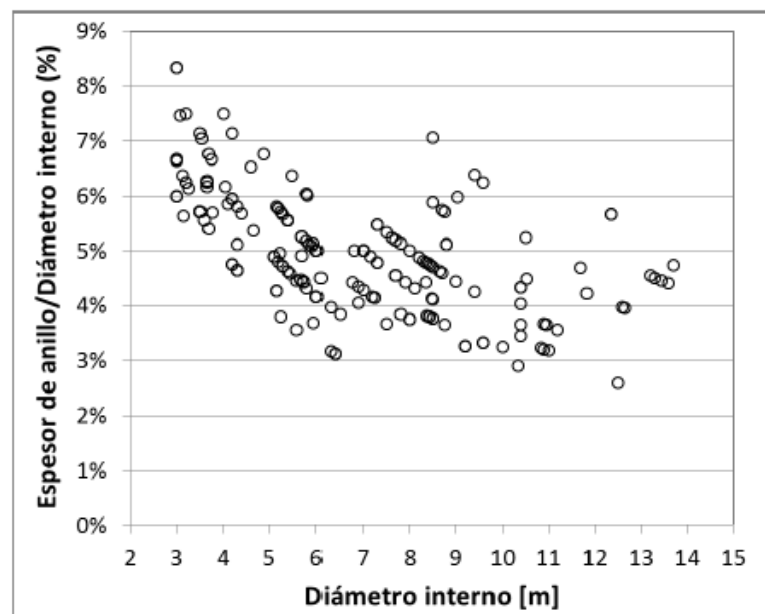


Fig. 3.7 "Relación entre el diámetro interno y el espesor del anillo en 205 túneles. Modificado a partir de Salas y Della Valle (2012)"

Thickness will depend on loads carried by the ring, and dimensions of the tunnel machine, but usually varies in the range from 20 to 50 cm [Maid.2011].

Thickness also depends on strength behaviour of the segment, which can be affected by soil conditions, functionality, environment, type of segment joints and number of segments included in the universal ring. In soft soils, thickness must be approximately $1/20$ of the inner diameter ($1/20 D$), whereas in bigger diameters can reach $1/25$ [Groeneweg, 2007].

3.3 Interface among segments and ring

Along the segment ring installation, structure becomes temporary unstable since precast elements are temporarily assembled through lateral surfaces in order to provide continuity and to keep a proper lining up. It is necessary to provide connections between segments and ring to ensure a correct installation and stability, until the soil is injected and the lining not securely blocked. This function is carried out by a group of implemented accessories at joints, including bolts, connectors, cantering cones or packers, among others. In this way, the structural temporal interface is defined in this stage.

3.3.1 Interface among segments

As a general rule, universal segment ring is formed by similar segments sizes and a smaller one, better known as the key. It has a wedge shape and is smaller than the others, which allows closing the ring (Fig. 3.8).

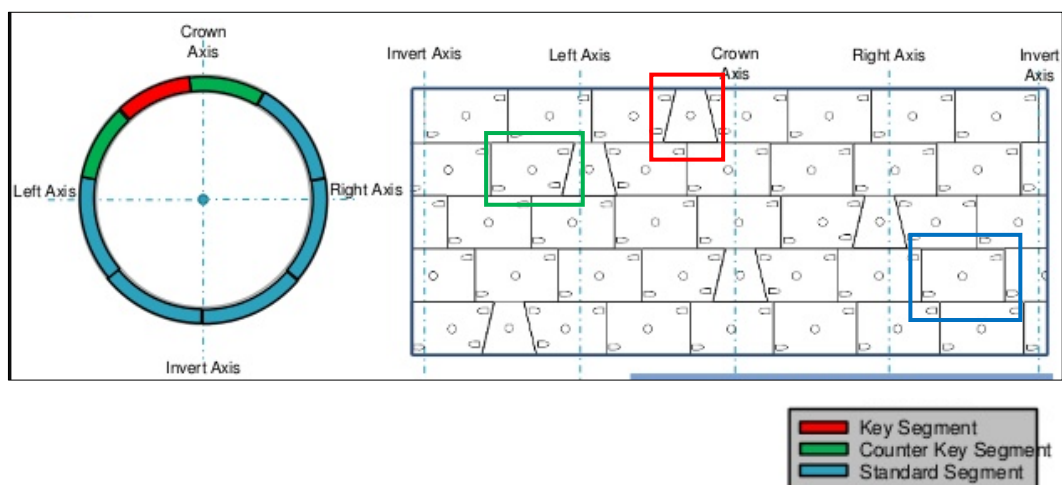


Fig. 3.8 Universal ring segments, key segments and counter key segment

Segments must have similar dimensions. For this reason during the fabrication process control in segments measurements is made. It is measured along the finished piece, so a control of dimensions between segments of the same ring is done. Recently, a tendency to measure formworks instead of the segment is prevailing.

Depending on the joint different shapes will be obtained. In the case of longitudinal joint, parallel to the ring axis, then the shape is rectangular. In the other case, the shape is trapezoidal.

A joint exists between segments. This contact area can transfer mechanical elements to other segments.

There can be distinguished two types of joints in the lining: joints between adjacent rings and joints between same ring segments (Fig. 3.9). The first ones are called transversal or circumferential joints, whereas the second ones are called radial or longitudinal joints.

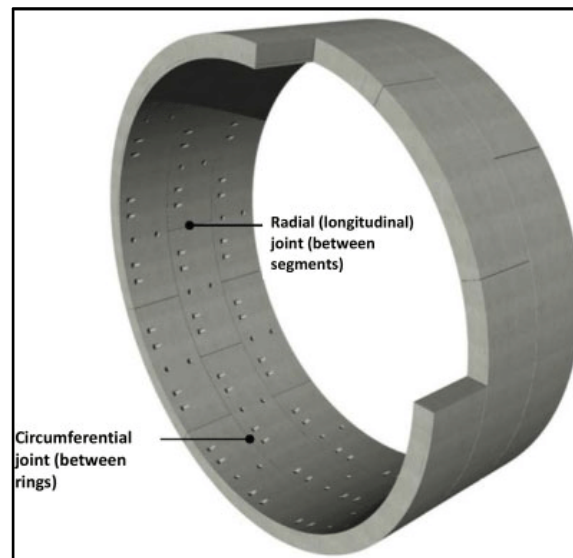


Fig. 3.9 Radial and circumferential joint scheme

- **Longitudinal joints**

Longitudinal joints transfer axial ring forces, bending moments from eccentric axial forces and shear from forces from external and sometimes also internal loading. This occurs mostly through the contact at the contact surfaces, and in some cases also through the bolting of the longitudinal segments joints. In the usual precast concrete segment system, the longitudinal joints are hinges or partial hinges from the structural point of view with a limited capacity to transfer bending moments.

- **Guidance rod**

Guidance rods allow a proper location and circumferential centring of tunnel segments. They help to speed up installation between rings, apart from helping to assembling of on segment with another.

At joints between segments of the same ring, also called radial joints, it is common to lay on guidance rods for two reasons: on one hand, it helps to place segments starting from an accurate fitting and diminishing steps or errors between segments; and, on the other hand, it provides a certain shear stiffness on the joint, because of an interposition of a mechanical element, preventing from reciprocal movement. As an inconvenient, its interposition reduces the contact area between segments, so it is not recommended in situations of big axial stresses, comparing to the width of the joint. In this case, it must be included a verification that considers this reduction in the contact surface [Della Valle, Castellví.2016].

Hereafter (Fig. 3.9) it is shown the sketch of a joint with guidance rods:

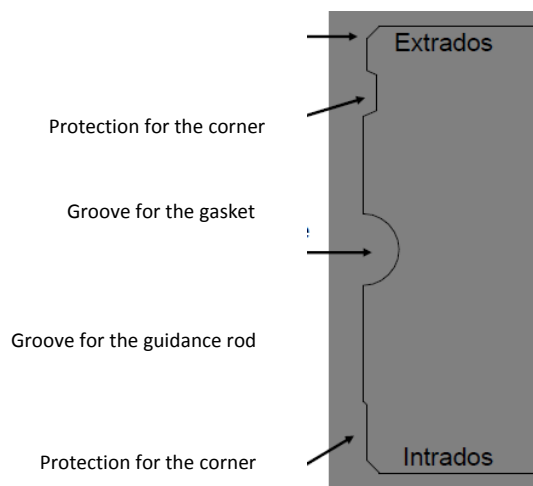


Fig. 3.10 Guidance rod scheme

Guidance rod is used between segments of the same ring. It allows the segment to be guided into its position during the assembly stage and it functions as a shear pin.

- **Bolts**

To put together segments of the same ring, it is still common to use bolts of appropriate length, which also have a temporal function and can be removed once the filling of the annular gap is hardened. Bolts are generally dimensioned to keep the seals compressed, satisfying thus

the short-term imperviousness requirements, and to keep in place segments in case of operational errors during the ring reinforcement at the shield [Della Valle, Castellví.2016].

As previously indicated, there is a trend to disregard bolts, adopting a trapezoidal segment shape. In the next picture (Fig. 3.11) it is shown two segments with guidance rods and connectors, but without bolts in the joints, due to the trapezoidal shape of the segment.



Fig. 3. 11 Segments with guidance rods and connectors, but without bolts in the joints

Joints with bolts, requires more effort in the construction of the mould because it is necessary to create "pockets" and "grooves" into which the bolts are inserted. It is also necessary to have more personnel in the tunnel to insert the bolts. This type of connection is traditionally correlated to rectangular segments and is generally used both between rings and between segments, within a ring. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008]

The bolts themselves are metallic while the embedded threads, if present, are generally in plastic.

3.3.2 Interface among rings

The union between rings is done through the socket and the coupling pin, in order to avoid undesirable differences in deformations between them, and to ensure imperviousness. Tight tolerances of the socket and the coupling pin can conclude into damage and loss of quality [Blom.2002].

Packers are set through the circumferential joints between rings, to reduce local stresses between segments. If there are no big located damage concentrations, packers can be disregarded, as long as the shear stresses between segments in direct contact can be more than double the packers [Cavalero.2009].

Time ago, it was common to adopt ring joints with grooves in the concrete as shear keys in order to transmit shear stresses, but it caused problems for being a very stiff structure. Also these sections were impacted by tolerance issues or were easily broken. Consequently, nowadays, it is preferred flat surfaces demanding stiffness to connectors [Della Valle, Castellví 2016]

Shear strength of those connectors can be very high, which can be used to stiffen rings and to allow openings into the tunnel walls. In case of building a connecting gallery, it will be necessary to demolish some tunnel rings. In these cases, if it is wanted to avoid heavy steel structures, it can be used shearkeys or super-connectors, as shown in the following Fig. 3.12:

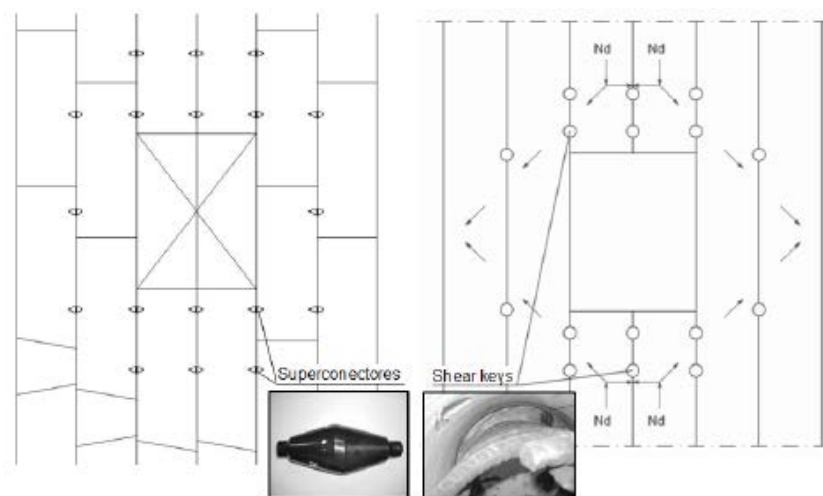


Fig. 3.12 Placement super-connectors and shearkeys around an opening in the ring

It is important to highlight that the combination of connectors, guidance rods and inclined joints lets to eliminate the need of inner pockets, and therefore, tunnel lining conditions improve. This is an important topic for hydraulic tunnels, where flat segments without parts that stand out present a minor resistance to water flow [Della Valle, Castellví.2016].

Joints with dowels require less work for the construction of the mould and less manpower in the tunnel as the insertion is automatically performed by the erector when the segment is positioned. The dowels and nuts are made of plastic and sometimes have the core in steel. The figure X shows the typical housing of a pin, which is placed on the axis with the middle point of the segment, for the variety with a nut and without a nut, in which the pin is directly forced into a hole cut out of the concrete. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008]

This type of connection only intervenes between the rings. This connection can be used only for rhomboidal and/or trapezoidal segments to avoid early crawling of the gaskets during the segments-approach phase of the ring assembly.

Presently, in many projects, the type of joint used is the one with flat joint without connectors. In this kind of joints, placed bolts permit the correct location of segments during the

construction, but they do not have any specific structural function. The behaviour of the joints significantly influenced by the normal force N acting in the joint, which is due to radial pressure imposed by the soil to the tunnel. Forces are transmitted by the contact from concrete to concrete in extrusions that cover slightly have of the segment section [Peña *et al.*, 2012]. In others, coupling pins are kept, although it is intended to substitute them by bigger cantering cones that can carry a cantilever segment during its placement.

The mechanical behaviour of joints is one of the main parameters that modify the structural behaviour of segmented rings. Joints will modify the behaviour of the ring in the following way [Henfny 2004; Peña.2010]:

- Increasing the number of joints, the bending moment and the acting forces in segments decrease.
- The behaviour of the joints depends on the geometry, the mechanical properties of the material, the relation between vertical and horizontal loads and the type of connection used.
- The relative orientation of joints with respect to loads will modify the stress level and the mechanical distribution of the ring elements.
- It exists a critical number of joints in which if the bending moment increases it will not diminish.

Local contact pressures can be reduced due to packers, which also improve friction mechanism that allows the ring to be stable during the excavation progress.

Finally, length has relation with the size and weight of segments in order to properly handle, the inner gap of the uplifting zone of TBM, and curvature radius lining. The lesser the number of segments, the faster construction will be, since the TBM is capable of handle them if there is enough space [Peña.2014].

3.3.2 Interface with the ground

The process of shield tunnelling with segmental lining leaves a gap between the excavated ground and the lining, termed the annular gap. This has to be filled with a suitable material in order to provide the appropriate bedding for the segment tube and to ensure a uniformly distributed transfer of the loading from ground pressure and also to counter any loosening of the surrounding ground. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008]

3.3.2.1 Mortar grouting

Tunnel mortar grouting constitutes an important connection between the soil and the structure, prevents from excessive movements of rings, minimises soil settlements, diminishes bad linings between segments and acts as an additional barrier to potential water infiltrations.

Depending on the transport, injection and mixing characteristics, the mortar will present a determined design mix. Furthermore, it must be injected with no segregation or exudation; keep good workability during the injection stage, and finally, be able to reach certain strength in a short period of time in order to provide support to the segmented ring.

In the fabrication mortar process, some stages can be defined:

- First stage: determine production conditions, appliance and material characteristics used.
- Second stage: dosing. Mixture composition is determined.
- Third stage: mortar production with previously defined characteristics.

This procedure is repeated for all the type of soil found. Then, for each one, mixture composition must be defined, the time of mortar gel, the system and transportation, mortar strength once injected into the ring, sampling methodology, theoretical volume of injection and the injection pressure, both the operational and the maximum.

It can be differentiated two types of mixtures:

- One-component mixtures

Almost obsolete, there are the mixture injections of sands, eventually cement and water. In these mixtures, an unnecessary quantity of water is pumped with sand, for the purpose of guaranteeing a uniform distribution of the material around the tunnel. A big disadvantage of this technique is that it is common to inject an insufficient amount of sand, which results on poor fillings with small bearing capacity.

Another widespread technique is the gravel injection following, after a while, by a mortar injection or a cement grouting, to consolidate the annular gap filling[Cavalero.2009].

- Two-component mixtures

These kinds of mixtures are constituted by a component A (generally resultant from a mix of clay, cement, plasticisers and air entrainments) and a component B (the phase that activates the hardening). With the addition of air entrainments, mixtures with air content close to 15% are achieved, which translates into specific mass between 950kg/m^3 y 1300kg/m^3 .

In any bicomponent mortar, the contact between the component A and the component B only occurs slightly before or slightly after of the injection, since the hardening activation is really fast[Cavalero.2009].

In the hardening stage, the mortar can reach 2 MPa of uniaxial compression strength. In this case, the evolution of the strength is mainly influenced by the homogeneity of the mixture between components A and B. If the mixture is not correctly done, it means a considerable reduction of compression strength.

If, on one hand, these ones permit a better control on the beginning of hardening and a faster hardening and filling consolidation, and on the other hand, an unappropriated mixture of components A and B can considerably compromise mortar properties, it must be considered whether the injection of components are separate, once the mixture occurs in the annular gap in difficult control and access conditions.

The mixture is considered as important as the quality of materials. The capacity of the plant and the storage tanks must be sufficient, at least, one complete ring without interruptions. Moreover, whenever possible, the mixture and pumping team must be designed taking into account the progress speed of the tunnel machine and the placement speed of the segments.

3.3.2.2 Mortar injection

It is possible to differentiate two types of application depending on the characteristics of the ground and the type of TBM chosen for the excavation. The choice of one method or other depends on the compatibility between the type of injection and the ground.

- Continuous method

The injection is performed simultaneously with the excavation and the own TBM. One of the cases would be in ground of weak formations to reduce the displacement of the ground. When injection takes place from the tail settlement are considerably reduced the seats, even in very soft ground (Fig. 3.13).

In this type of method, the mortar must be prevented from entering the tunnel again by the tail of the TBM or by the joints between the precast segments.

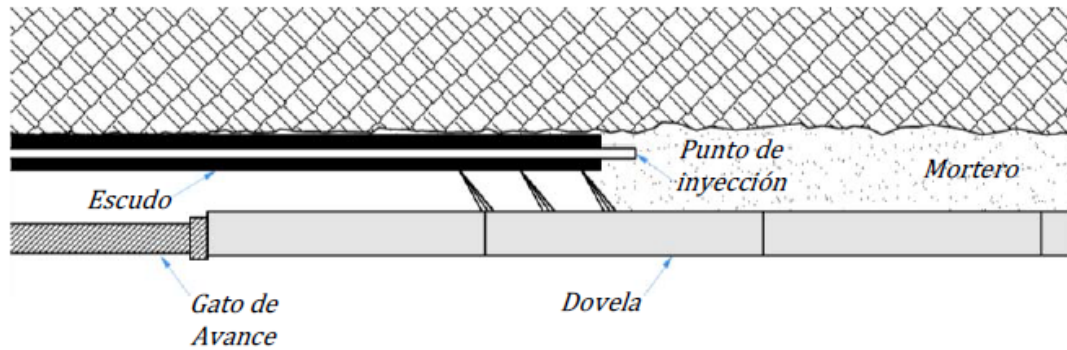


Fig. 3.13 Continuous method injection

- Discontinuous method

Mortar is injected directly into each ring that has completely come out of the TBM's tail. The injection is made from the openings in the precast segments, there must be at least four openings positioned in a staggered way around the ring. The process is discontinuous since injection moves to another opening once the mortar level has been checked (Fig. 3.14).



Fig. 3.14 Discontinuous method injection

There are two types of injection:

- Primary injection: its function is to fill the annular space. The mortar is injected through the orifices while the top is removed to allow air to pass through. This type of mortar is very fluid and a good part of the injected mortar is usually lost in loose ground.
- Secondary injection: used to seal and stabilize the filling. The injection is performed quite some time after the primary filling since it is essential to wait until settlements on the ground have stabilized. The injection must be repeated in the event of significant long term displacement.

Uplift loading is the effect where the injected ring tries to move up because of the injection, but it is constrained by the next ring already injected and hardened, inducing loads then which mutually transmitted. These loads appear in the assembly stage of the lining, and must be also considered in the design, even if they are not included in the serviceability stage. The uplift effect appears as a result of the dynamic of the injection combined with the ground reactions as well as due to constrain provided by the previous rings. This effect is different is the case of reduced overburden, that is in shallow tunnels. The way to avoid this ovalisation process is to ensure fast stiffening of the grout in order to provide sufficient soil support to the lining. In this case the uplift loading case is skipped [Blom.2002]

3.4 Material precast segment

3.4.1 Concrete

Precast segments are made by reinforced concrete that is executed in moulds prepared for it. Batching plant is inside the fabrication premises. Usually a carousel system is implemented, where the movable formworks follow several positions which include the steam curing tunnel (Fig. 3.15). In other cases there are fixed formworks with several teams and equipment moving around.



Fig. 3.15 Precast segment transport. Herrenknecht-formwork Company

Currently the industrial prefabricated system implies early age demoulding. For a handling without risks it is desirable that the resistance has reached values between 15 and 17MPa (cylindrical resistance). Currently it is recommended to demold at 8 hours, which involves that to achieve the necessary resistance at the early age, the resistance to 28 days reach 40MPa (in cylindrical tube) without problems. [Della Valle, Castellví.2016]. In other cases 20 MPa are requested when considering C 50 Concrete.

The concreting process is sometimes complex due to the difficulties of this relatively dry material to flow between the reinforcement bars. Recent studies [Cavalaro.2009] show that the production of segmented lining using self-compacting concrete in horizontal position is feasible with the same equipment and manufacturing process commonly used, resulting also in a notable reduction of noise emission to the surroundings and less conformities (cracks, splinters..)

In aggressive environments it may also be necessary to use special cements and selected aggregates in order to resist possible chemical attacks of water o ground.

However, it should be clear that in addition to a high quality of the concrete, a high quality of the preparation and installation procedures of the precast elements is requested in order to get an excellent final product.

3.4.2 Steel frame

There are currently two reinforcement systems in use for precast segments, one with steel bars and other with metal fibres (Fig. 3.16). It is also possible to use a combination of both. Selection of one type or another depends on the ground loads as well as the connection devices among segments and future openings in the lining considered in the design



Fig. 3.16 Example of steel frame

3.4.2.1 Guidance rod

The most used system remains that of the steel bars $f_y = 420 - 500$ MPa, in quantities that, in general, are in a range between 85 to 115kg/m³. The higher or lower amounts depend on the expected ground and internal loads, although in most cases when only compressive stresses are taking place, the amount of steel is dictated by production and installation reasons or by minimal values defined in the standards. However it must be stated that bar reinforcement can be unavoidable in the case of important forces provided by the thrust of the shields and also when high eccentricities of the axial loads on the lateral side of the precast segments are expected. Both effects can produce tensile stresses which can exceed tensile strength of the concrete (Fig. 3.17). [Della Valle, Castellví. 2016]



Fig. 3.17 Guidance rod in the precast segment

3.4.2.2 Metal fibres and combination with bars reinforcement

In recent years the use of steel fibres for reinforcement of the concrete has been encouraged alone or with a minimum amount of conventional bar reinforcement in order to absorb the efforts caused by installation and thrust. The possibility of combining metal fibres with bars is now reflected in regulations such as the Model Code, which has already introduced the "composite material" indicating the structural calculation rules. Similar considerations have been included in the Concrete National Standard EHE (Fig. 3.18).

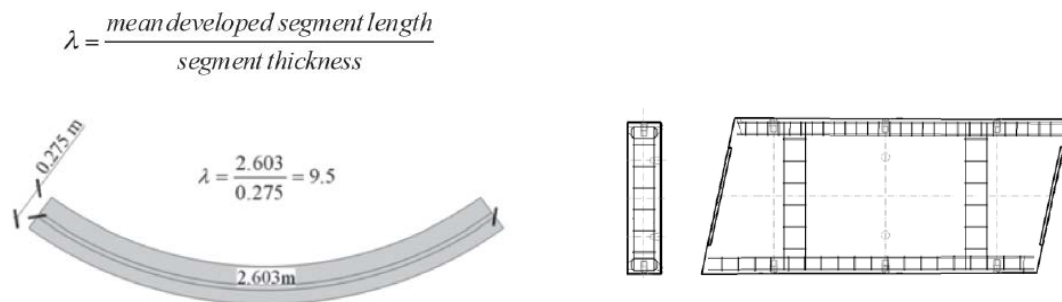


Fig. 3.18 Slenderness relation. Image ITatech (2016)-Reinforcement a mixed precast segment

In general, the value of fibres dosage varies between 35 and 45 kg/m³, and is also impacted depending on the type of fibre (length/diameter ratio) and the strength of the concrete. In the case of mixed reinforcement, an average value is 35 kg/m³ of bars and 25 a 35 kg/m³ of fibres. Nowadays the development of more efficient geometries and the adoption of new materials such as treated steels is allowing to improve the efficiency of the fibres and thus the final characteristics of the concrete (Fig. 3.18).

In the current state of the art technology it is possible to use only metallic fibres in the case of small dimension segments, which means more precast segments per ring, with its corresponding increase in the time of placement and of meters of joints in the tunnel. Both option must be studied comprehensively.

On the other hand, the use of metallic fibres confers important structural and durability benefits that make their adoption very advantageous, as well as more ductility and post peak strength. They improve for sure the resistance in front of impacts and the behaviour in front of local concentrated loads.

3.4.3 Precast fibre reinforced concrete segments for tunnel support

The use of fibre reinforced concrete (FRC) in precast segments for tunnel support is an increasing practice. However, although the suitability of this material seems to be proven at a technical and economic level, there is still some reluctance towards the natural implementation of this material. In fact, in those cases in which fibres were added to concrete, the structural contribution was not taken into account in the design.[*de la Fuente, Blanco, Pujadas, Aguado.2014*]

In the case of the precast segments the advantages of the use fibres are appreciated in the case of to cope with the concentrated stresses which can occur during the transitory phases (demoulding, stacking, transport, assembly and during the thrust provided by the jacks). The structural contribution of the fibres can lead to replace totally or partially the passive bar reinforcement and to increase the efficiency of the production. Competitiveness of the reinforced concrete with fibres (HRF) compared to traditional alternatives in this type of application has a lot of potential.

For example in Barcelona there are some sections of tunnels HRF was used for the construction of the lining with precast segments. The use of fibres, either metallic and/or plastic, is expected to improve the response of the material to the impact and also in front of fire.

3.5 Waterproofing

The tunnel lining with precast segment have a large number of joints which are actually easy accesses for the entry of fluids (water, gas...) from the ground to the internal space of the tunnel or vice versa. In most of the cases, it is desirable to keep the tunnel dry and avoid any fluids exchange between the inside and outside, so it is necessary to install in the joint between precast segments and rings a sealing system, in what in a conventional tunnel would be a waterstop or also a gasket. [*Della Valle, Castellví.2016*]

The most currently used system is to put between precast segments a synthetic EPDM rubber seal (Ethylene Propylene Diene Monomer). This type of rubber gets better resistance to heat, ozone, some chemical and weather attacks than other rubbers.

EPDM seals are placed in the outer side of the segment in a width between 26 and 33mm (in particular cases wider seals are applied).When EPDM is compressed with a force in the range from 40 to 60 KN/m it reaches a resistance to the water passing that goes from 4 to 20 bars or more, depending on its geometric configuration and the hardness of the joint. To further improve the resistance of the water passing, some designers have designed precast segments with double seal in EPDM, one in the intrados and other in the bottom surface. [*Della Valle, Castellví.2016*].

In past projects and as an additional measure second hydro-expansive joint was placed by the intrados of the ring, to intercept possible inflows of water in case of failure of the main seal. This system has its limit on the fact that this type of gasket suffers swelling with water and if not

well confined it is extruded and completely loses its efficiency. There also doubts on its behaviour in front of dry and wet cycles. For this reason, seals are currently used with EPDM and hydrophilic material (Fig. 3.19) where it is confined so that it can develop its function in an appropriate manner. In recent projects with high presence of water a double gasket seal has been implemented.

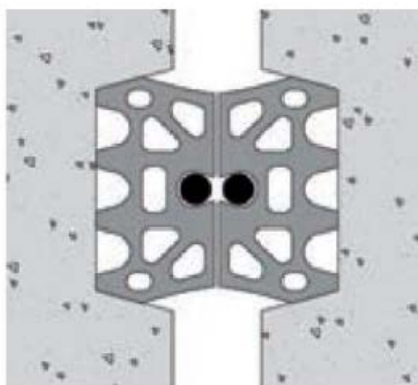


Fig. 3.19 Seal with hydrophilic inserted (Datwyler)

In order to place the seal grooves are prepared on the perimeter faces of the precast segments, and once the segment is removed from the mould the seal is glued inside them. This system presents the disadvantage that during transport or placement, the sealing gasket can be removed and loses its functionality. For this reason, a new technology is being affirmed which allows to place the gasket in the same mould at the moment of the concreting process (Fig. 3.20) so that it is firmly installed within the precast segments. [Della Valle, Castellví.2016]

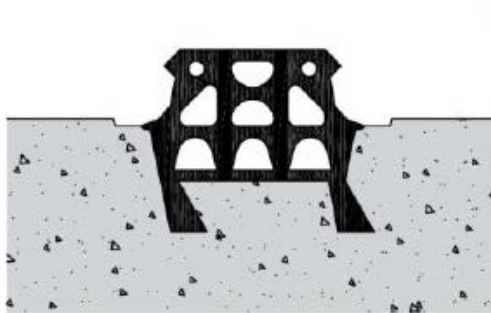


Fig. 3.20 Seal within the concrete (Datwyler)

This system avoids the displacements of the seal when placing the segment. New improvements now being tested consist in placing the seal in the central part of the segment (Fig. 3.21). With these new solutions it is possible the weak point created in the edge of the segment is fixed [Della Valle, Castellví.2016]

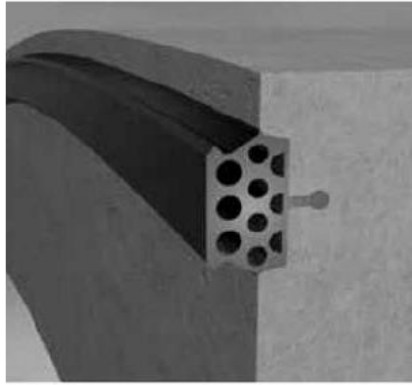


Fig. 3.21 Seal Trelleborg, with a only anchorage to the concrete

3.5.1 Gaskets

As explained in the introduction of this section, gasket seals are the key element in order to ensure waterproofing in the lining. In most single-layer transport tunnels with segmental linings in hard rock or loose ground, the penetration of formation water or groundwater is prevented by the provision of continuous gaskets in the longitudinal and ring joints (Fig. 3.22). The closing of the segments during assembly compresses the butting gaskets and seals the joint. The contact pressure of the sealing frames has to exceed the water pressure acting on one side. The concrete surface of the groove must be free of air holes, in order to prevent water bypassing the gasket. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008]

In the ring joints, the required contact pressure is applied by the introduction of the forces from the thrust cylinders and is stored elastically, unless long term creeping effects already under study. In the longitudinal joints, the sealing profiles are compressed by the axial compression force from ground and water pressure.



Fig. 3.22 Example gasket in the precast segment

3.5.2 Packers

Packers are contact elements in the joints between precast segments (Fig. 3.23). The use of packers is usually associated with others union elements, such as centering cones, bolts and male-female connections.



Fig. 3.23 Packer in the joint between rings

The packers use to have some lacking order to facilitate the assembly of the ring so that they can only start to work structurally after certain very little displacement of the precast segments is achieved.

Packer's main function is to distribute the loads on the contact surface between the precast segments without generating high stress concentrations, load's eccentricity or high tangential stress. In the case of circumferential joints, the packers can be more critical because the joints receive the loads of the TBM advance in the construction phase.

Another of these functions is to avoid that the load is transmitted through the area of the segment where no reinforcement is placed which is the cover area

There are three types of packers:

- Bituminous packers: when pressure is exerted by the hydraulic jacks in the advance, the material is deformed and adhered to the surfaces of the precast segment. Thin films are used.
- Rubber packers: these are polyurethane or polyethylene thin films with rigidity and thickness superior to that of the bituminous packers. This prevents direct contact between concrete and gaskets. Therefore the transmission of the load between rings is totally influenced by the position and extension of the packers.
- Birch plywood: it has a similar behaviour to the rubber packers. It allows better control of the non-uniformities of the joints in addition to presenting greater capacity to transmit tangential tensions. [Blom.2002]

3.6 Fire resistance

Advances in recent years have shown that together with the addition of selected aggregates with low absorption (Fig. 3.24) the most effective way to confer an excellent fire resistance to precast segments is, to add in the mixture a content of between 1.5 and 2Kg/m³ of monofilament fibre with the following characteristics:

- Melting point of the material 160 °C maxim and maximum diameter of 20 µm fibre
- Length of fibre between 6mm and 12mm

It has also been shown that the addition of metal fibre also greatly improves the performance of precast segments in case of fire. [Della Valle, Castellví.2016]

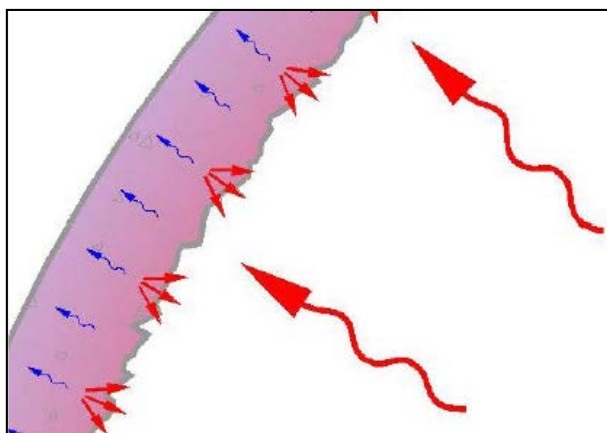


Fig. 3.24 Concept of heat dissipation

3.7 Ring assembly

In a broad sense, the assembly process begins with the supply of the segments at the portal and ends with the exit of the already constructed ring from the tail of the TBM. The segments are brought into the tunnel in wagons that move either on wheels or tracks. The order of arrival of the segments at the erector must be programmed to respect the assembling order; therefore, the first to arrive is the first to be assembled. For this reason the segments arrive in packages to the back up and then they are distributed following this principle, In order to make this process easy, the segments are marked with letters and/or numbers which clearly give the assembling sequence. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008].

In the field of segmental lining design there are still individual considerations using different experiences on the contractor's side, different cultures and designer's requirements.

3.6.1 Assembling the normal segment

Contemporary systems in use are mostly relying on the precise connection at both the ring among rings and among segment by using dowels and guiding rods. Both elements are needed for a high qualified lining avoiding any off sets. [D2 Consult International. 2013]. However, there is a trend for removing dowels and bolts in front of centering cones and other new designed accessories, particularly when using trapezoidal segments.

. In order to construct the ring assembling of the first segment (usually the counter key) is followed by the others, one on the right and one on the left until reaching the key segment, and then the complete ring is finalized.

In the following pictures a simplified illustration of the system for assembling trapezoidal or rectangular segment is presented. It can be observed that the joints between two adjacent segments of the ring are never in the same angular position (Fig. 3.25.).

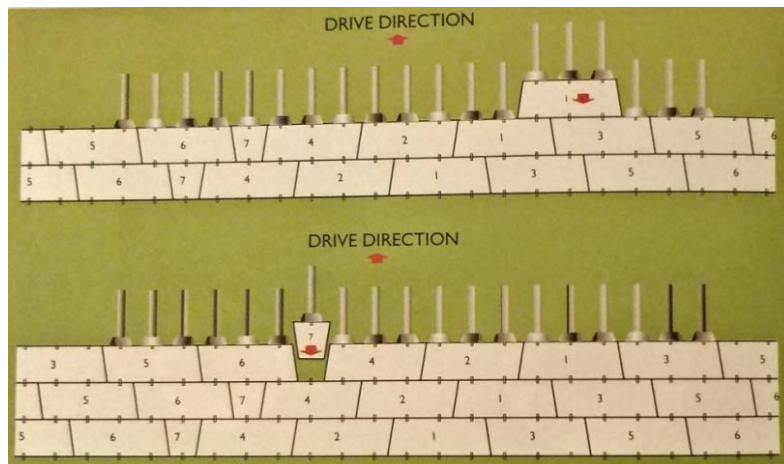


Fig. 3.25 Assembling process

In the case of rectangular segments the situation is different. When using trapezoidal ones the geometrical constraints which exist between the distance covered by the pressure pistons of the machine and the inclination of the oblique sides of the crown are required in order to ensure a correct and safe insertion. The next figure gives a simplified illustration (Fig. 3.26).

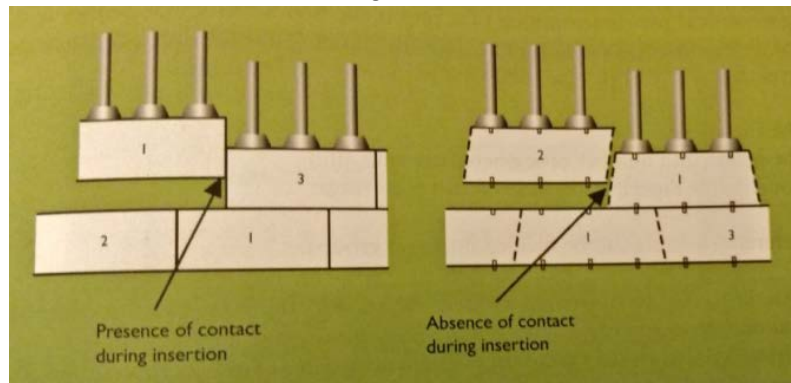


Fig. 3.26 Need of the trapezoidal segment in presence of connectors

The joining with dowels foresees that the segment should already have the aligning connectors assembled when it is moved towards the ring, that is, that the final movement of the segment is forced to follow the direction of the rings axis, at least for the last stretch of 15-20cm, which corresponds to the length of the protruding part of the pin. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008].

When using rectangular segments, the seal would be dragged along the final part and could be eventually destroyed or ripped (Fig. 3.27). Therefore, the trapezoidal segments are used as the practical alternative in order to improve waterproofing (Fig. 3.28).

Therefore, with the universal ring considering trapezoidal segment, dowel and guiding rods are placed in such a way that only one installation direction activated by the erector is needed. In contrast for rectangular segments a bi directional movement is needed (range of about 1cm). That looks minor, but for the overall accuracy of the lining an important factor.

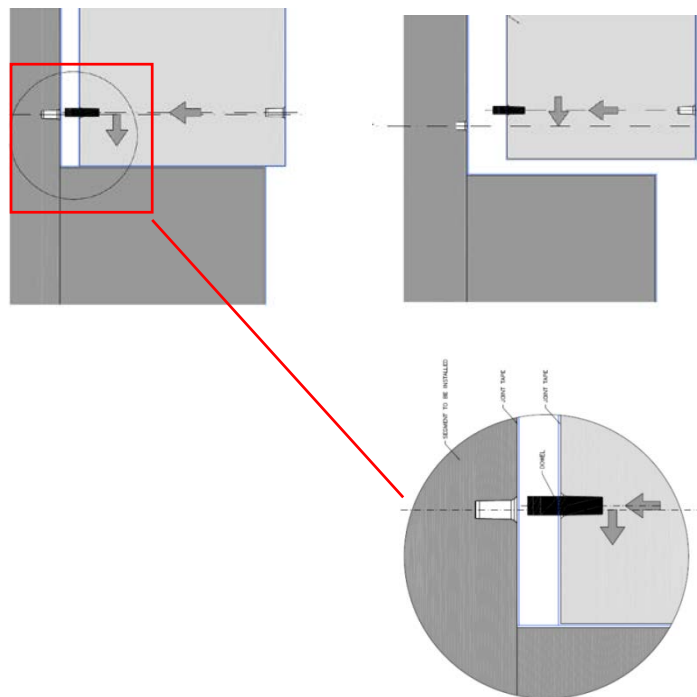


Fig. 3.27 Movement of the erector for the placement of the rectangular segment, with two movement

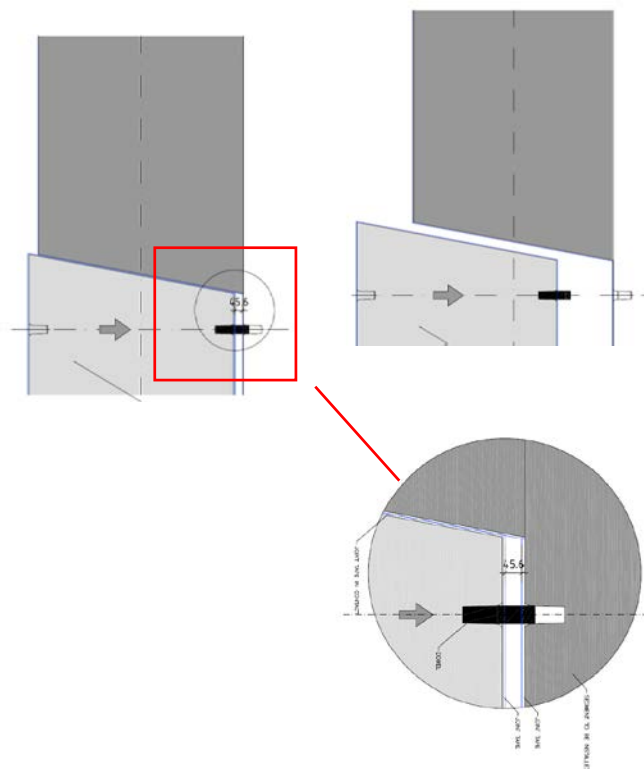


Fig. 3.28 Movement of the erector for the placement of the rhomboid segment, with a single movement

3.6.2 Assembling the k-segment

When using the unified ring concept or universal ring, which means there is only one conical ring configuration using for all driving directions, ring must be rotated between 0 and 360 degrees. That means also the key stone segment can take all location around the circumference also the location at the bottom. [D2 Consult International.2013]

The key segment or k-segment is the last to be inserted and, therefore, the movement that takes it into position has to be of a longitudinal type, that is, parallel to the tunnel axis, after it has been placed in the correct radial position. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008].

If the joints that separated the segments are radially orientated as in the rectangular segment, it is necessary that the thrust jacks have a stroke longer than the maximum segment length of a certain quantity for allowing space for the key assembly (Fig. 3.29).

The insertion of the k-segment is obviously a very delicate operation and, therefore, the care and ability of the operator of the erector are of great importance. [Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu.2008].

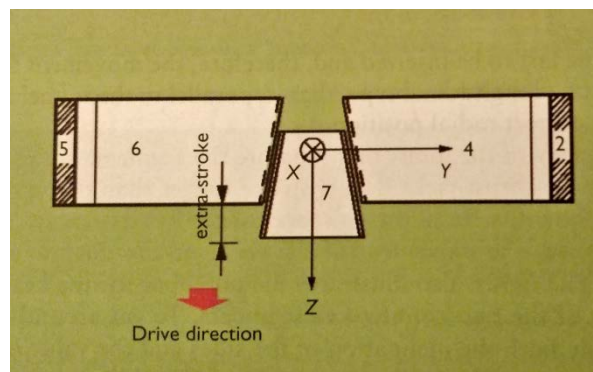


Fig. 3.29 Radial movement of the k-segment before insertion

3.6.3 Ring positions

In almost all of the projects where trapezoidal segments with inclined longitudinal joints were used high success was achieved in terms of tightness, accuracy, practically no offsets and performance rates.

Another advantage of trapezoidal shape is the fact of the number of possible crossed joints (intersections of longitudinal and transversal joints) is less. Therefore safety against leakages increases due to more allowable rotation positions.

It is necessary to emphasize the permissible positions and the ones not allowed in the placement of the rings, since some positions can produce joints in cross (when the radial joint and the joint circumferential seal coincide in the same point). Therefore is necessary study which positions can be installed to avoid cross-joints. [D2 Consult International. 2013]

The following images are shown (both for rectangular and diamond segments) a study of the permissible positions and not allowed for each of them.

Not permissible positions for produce joints in cross (Fig. 3.30 and Fig. 3.31)

Fig. 3.2

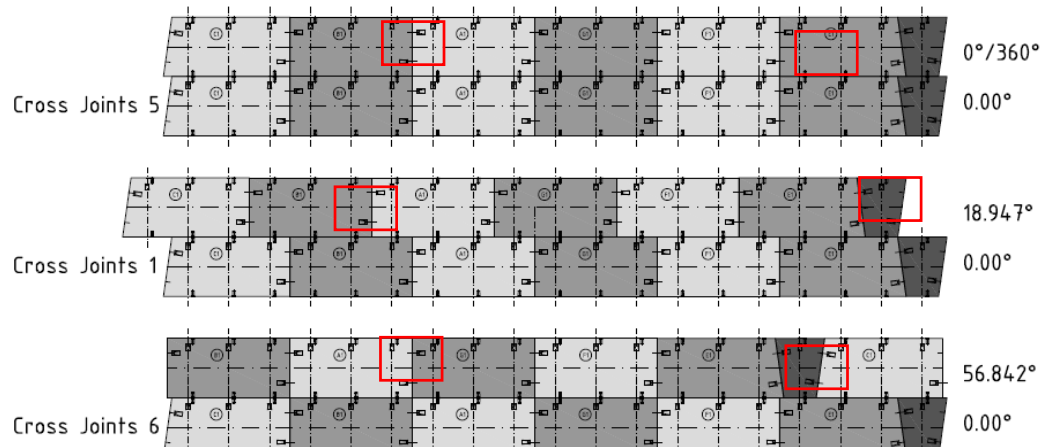


Fig. 3.30 TBM tunnel not allowed rotations in rectangular precast segment. Cross Joint

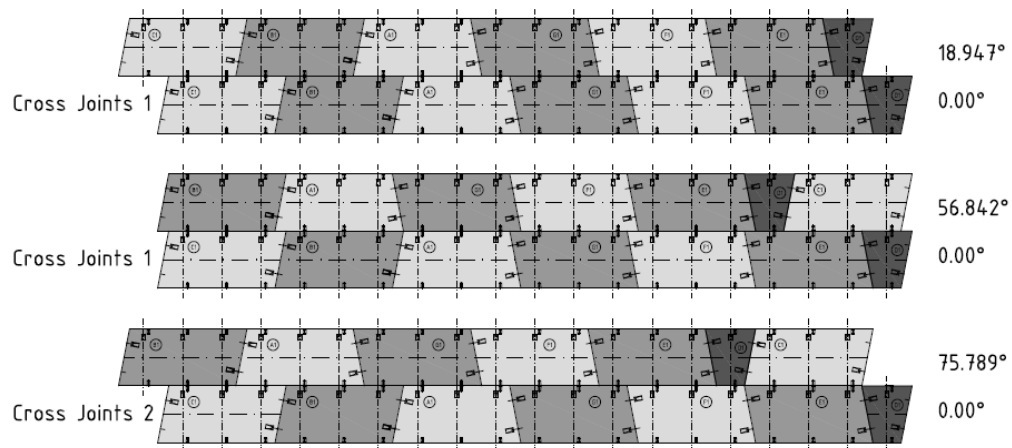


Fig. 3.31 TBM tunnel not allowed rotations in trapezoidal precast segment. Cross Joint

Permissible position not produce joints in cross (Fig. 3.32 and Fig. 3.33)

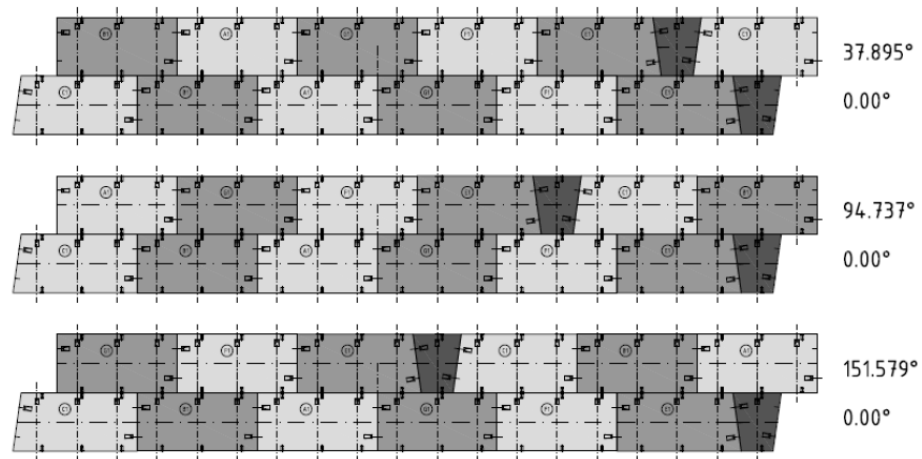


Fig. 3.32 TBM tunnel allowed rotations in rectangular precast segment. Cross Joint

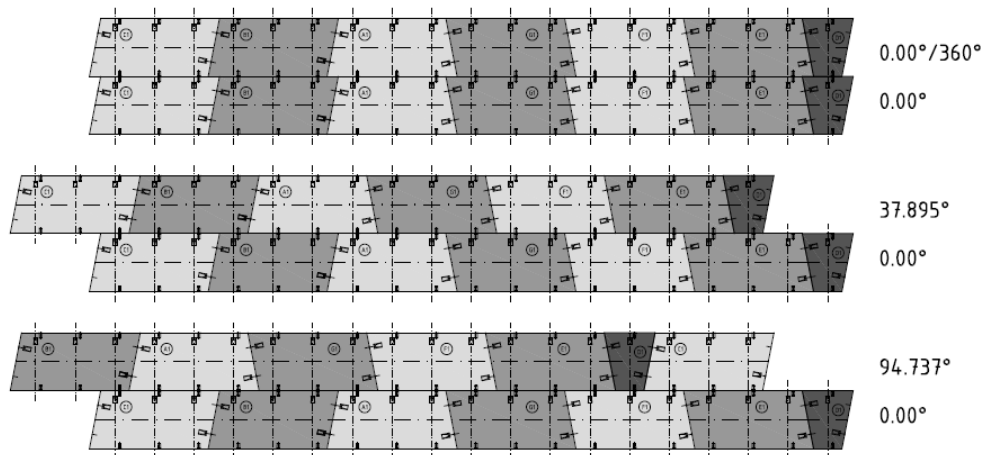


Fig. 3.33 TBM tunnel not allowed rotations in trapezoidal precast segment. Cross Joint

4. RISK MANAGEMENT

4.1 Definition

In order to address the objectives of this work it is necessary to refer to some frequently used terms such as projects, risk and risk management. A project is classically understood as a temporary endeavour undertaken to create a unique product or service. It has a certain scope, such as a service or product, and also a temporal slot of time. This is the main difference among projects and operations.

The risk of a project can be defined as an event or an uncertain condition, which, if it occurs, can be a negative effect or positive effect on one or more project objectives. The origin of the risks of the project is the uncertainty that is present in all the projects. The risks that are already known are those that have been identified and analysed, in order to plan an action response to them.

Project risk management is the process of identifying, analysing and then responding to any risk that arises over the life cycle of a project, in order to help the project remain on track and meet its goal. Managing risk cannot be only reacting in front of it, but should be part of the planning process to figure out risk that might happen in the project and how to control that risk if it in fact occurs.

Project Risk Management is a one of the relevant tools used currently in Project Management. As an example in Fig. 4.1 it can be seen how Project Risk Management is included in the Project Management Process Groups included in the PMBOOK

Knowledge Areas	Process Groups				
	Initiating Process group	Planning Process group	Executing Process group	Monitoring & Controlling Process group	Closing Process group
Project Integration Management	Develop Project Charter	Develop Project Management Plan	Direct and Manage work	Monitoring & Controlling project work Perform Integrated Change Control	Close Project or Phase
Project Scope Management		Plan Scope Management Collect Requirement Define Scope Create WBS		Validate Scope Control Scope	
Project Time Management		Plan Schedule Management Define Activities Sequence Activities Estimate Activity Resources Estimate Activity Durations Develop Schedule		Control Schedule	
Project Cost Management		Plan Cost Management Estimate Costs Determine Budget		Control Costs	
Project Quality Management		Plan Quality Management	Perform Quality Assurance	Perform Quality Control	
Project Human Resource Management		Plan Human Resource Management	Acquire Project Team Develop Project Team Manage Project Team		
Project Communication Management		Plan Communications Management	Manage Communications	Control Communications	
Project Risk Management		Plan Risk Management Identify Risks Perform Qualitative Risk Analysis Perform Quantitative Risk Analysis Plan Risk Analysis		Control Risks	
Project Procurement Management		Plan Procurements Management	Conduct Procurements	Control Procurements	Close procurements
Project Stakeholder Management	Identify Stakeholders	Plan Stakeholder Management	Manage Stakeholder Engagement	Control Stakeholder Engagement	

Fig. 4.1 Project Management Process Group and Knowledge area mapping

As this table shows, one of the first practical steps in Project Risk Management is to identify and list the potential risk associated with activities related to a particular activity, in this case the design and construction of tunnels, assigned them the probability that some risk materialize and associate an index of impact to its consequence. A number of measures should be defined to reduce the probability of risk and reduce the impact it may cause. This is what is called mitigation plans (Fig. 4.2) explains this process.

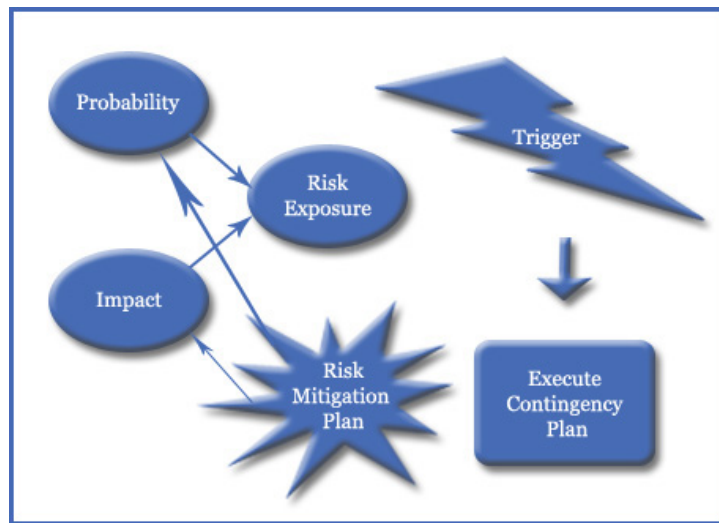


Fig. 4.2 Mitigation plans process

Risk mitigation is a risk response strategy whereby the project team acts to reduce the probability of occurrence or impact of a risk. However risk management is more than merely define mitigation measures.

Contingent Response refers to certain responses are designed for use only if certain events occur. Consequently mitigations try to reduce the probability while contingencies take place once the risk has been materialized, and it is no more a risk but an event.

Project Risk Management is a robust process and has a suitable methodology to clearly identify and manager risks (Fig. 4.3).

The environment within which decision takes place can be divided into three parts:

- **Certainty:** only exists when one can specify exactly what will happen during the period of time covered by the decision. This does not happen very often in the construction.
- **Risk:** is an event which may translate into a situation that has a potential to cause damages. Risk is associated a probability of occurrence and an impact.
- **Uncertainty:** defined as a situation in which there are no historic data or previous history relating to the situation being considered by the decision-maker.

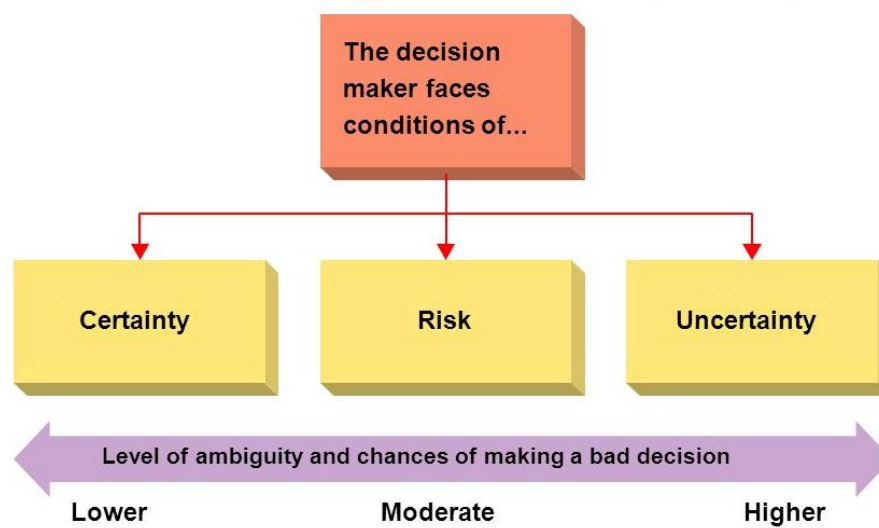


Fig. 4.3 Methodology to clearly identify and manager risks

"A company has to operate in an environment where there are many uncertainties. The aim is to identify, analyse, evaluate and operate on risks. The more one thinks about risk and uncertainty, the more one is inclined to the view that risk is the more relevant term the building industry". [Flanagan Roger and Norman George. 1973]

4.2 Project Risk Management

Risk Management of a project includes the processes to carry out the planning of Risk Management, as well as the identification, analysis, planning of response and the control of the risks (Fig. 4.4). The objectives are to increase the probability and impact of positive events, and to decrease the probability and impact of negative events on the project.

Known risks that cannot be proactively managed, should be assigned a contingency reserve. Unknown risks, on the other hand, cannot be proactively managed and can therefore be assigned a management reserve. A negative risk in a materialized project is considered a problem.

Individual risks are different from overall risks of the project, as they represent the effect of uncertainty on the project as a whole. It is not simply based on the sum of all the individual risks, but all the sources of uncertainty of the project are added.



The positive and negative risks are commonly referred to as opportunities and threats. The projects are accepted if the risks are within certain tolerances and are in balance with the benefit that can be obtained by assuming them.

Risk Management is also a support for Change management. Change is inherent in construction work. Change cannot be eliminated, but by applying the principles of risk management, engineers are able to improve the effective management of this change. Change is normally regarded in terms of its adverse effects on project cost estimates and programmes. [Smith, Merna, Jobling. 2006]

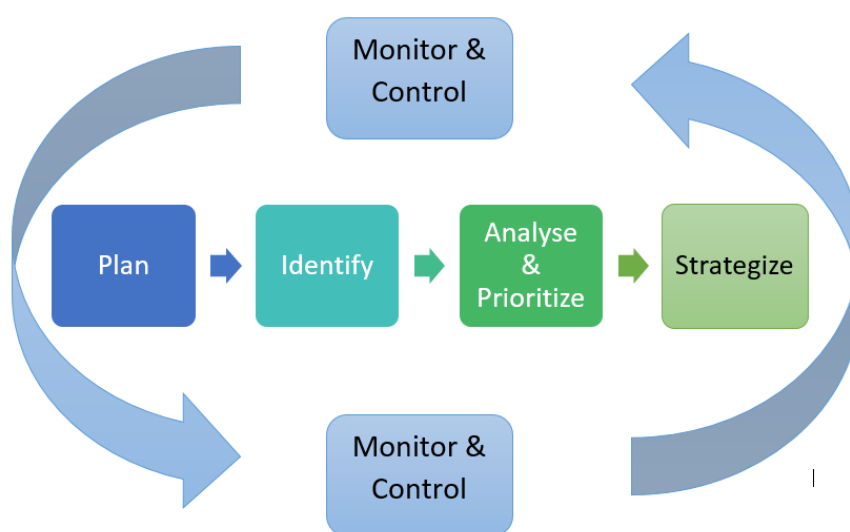


Fig. 4.4 Project Risk Management diagram

4.3 Plan Risk management

The first part of Risk Management is to plan it. Planning Risk Management is the process of defining how to perform the project management activities.

Planning is important to provide resources and enough time for the activities involved in this management. The process should be started as soon as the project is conceived and must be completed in the early stages of planning.

"The objective of implementing a Risk Management Plan for a project is to ensure that all risks are reduced to acceptable levels and managed most efficiently"[Grasso. 2002 ; Chiriotti. 2003]

Use of the Risk Management assures the timely identification and resolution of the potential problems. Risk Management is particularly relevant in the case of tunnels. For the project considered (namely design and construction of tunnel TBM linings), Risk Management Planning should be implemented as soon as possible and integrated in all phases of the project: design, production, handling and storage, management, activity finalisation and service state.

The objective of this planning is also to reduce in advance all the risk identified in each phase of the project life and to implement the preventive measures for reducing risk during the design and construction in general.

In this implementation of risk management should incorporate different technical perspectives and involve the participation of all the parties: Owner, Project Manager, Supervisor, Contractor, Experts and Designer.

A Risk Management Plan is an essential component and involves this steps (Fig. 4.5):

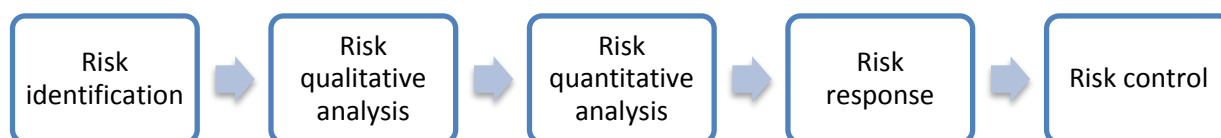


Fig. 4.5 The risk management framework

The application of Risk Management Plan means that the design and construction of the lining would be performed considering risk identification and probability methods. This process must be monitored continuously during the project, and should be checked and if necessary be optimised along the progress with the tunnel.

Implementing the risk planning will help also to understand all the processes through which the precast segment is undergoing as it is the primary element of the lining, and to identify the risk faster.

Risk Management has become an important point in the project implementation, as it comprises all planned stages, such as design, construction and eventually operation if needed.

4.3.1 Risk Identification

Risk identification is the first practical step in the risk analysis, given that the objectives of the decision-maker have been well defined. There are some of techniques used to help formalise the identification of risk. This part is the most informative and constructive element of the whole process.

To make correct risk identifications the following points should be defined:

- Objectives and requirements about the project
- Establish the tolerance of risk, both for the degree of uncertainty and for the level of risk assumption

Identify risks is an iterative process, because new risks may evolve or become known as the project progresses through its life cycle (Fig. 4.6). The frequency of iteration and participation in each cycle will vary by situation.

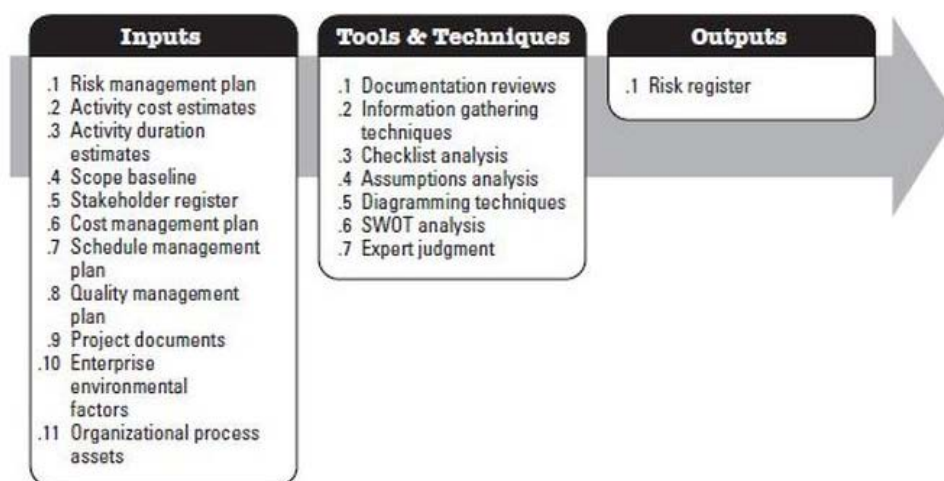


Fig. 4.6 Risk identification process

Examples of information gathering techniques used in identifying risks can include:

- **Brainstorming:** it consist of obtaining a comprehensive list of project risks. The project team usually performs brainstorming about project risks. Continuedly, the risks are identified and categorized by type of risk and their definitions are refined.
- **Delphi technique:** is a way to reach a consensus of experts. They participate in this technique anonymously, answering a questionnaire to solicit ideas about the important project risks. In a few rounds of this process the consensus can be achieved.
- **Interviewing:** interviewing experienced project participants, stakeholders, and subject matter expertshelps to identify risks.

- **Root cause analysis:** is a specific technique used to identify a problem, discover the underlying causes that lead to it, and develop preventive action

Once the risks have been identified using one of the above techniques, a record of these is made. The risk register is a document in which the results of the risk analysis and the risk response planning are recorded. The preparation of the risk register begins in the Identify Risks process with the information detailed below, and then becomes available to other project management and risk management processes:

- **List of identified risks:** therein are described in as much detail as is reasonable. A structure for describing risks using risk statements may be applied, for example, event may occur causing impact, or If cause exists, event may occur leading to effect. In addition to the list of identified risks, the root causes of those risks may become more evident. These are the fundamental conditions or events that may give rise to one or more identified risks. They should be recorded and used to support future risk identification for this and other projects.
- **List of potential responses:** sometimes be identified during the Identify Risks process. These responses, if identified in this process, should be used as inputs to the Plan Risk Responses process.

4.3.2 Qualitative Risk Analysis

Qualitative Risk Analysis is the process of prioritizing risks for further analysis or action by assessing and combining their probability of occurrence and impact. It is therefore necessary to have an effective assessment, as it requires explicit identification and management of the risk approach of key participants.

Definitions of the levels of probability and impact can reduce the influence of bias. Therefore, an evaluation of the quality of the available information on project risks also helps to clarify the assessment of the risk's importance to the project.

Additionally, Qualitative Risk Analysis is usually a rapid of establishing priorities for Plan Risk Responses and lays the foundation for Quantitative Risk Analysis (Fig. 4.7). This process is performed regularly throughout the project life cycle.



Fig. 4.7 Qualitative Risk Analysis

In Qualitative Risk Analysis the probability and impact of the risks are assessed. The probability of occurrence of each specific risk is studied. Risk can be assessed in interviews or meetings, which determine the level of probability for each risk and its impact on each project objectives. Risk probabilities and impact are rated according to the definitions given in the risk management plan (Fig. 4.8). Risks with low rating of probability and impact will be included within the risk register as part of the watch list for future monitoring.

			Potential Consequences				
			L6	L5	L4	L3	L2
			Minor injuries or discomfort. No medical treatment or measureable physical effects.	Injuries or illness requiring medical treatment. Temporary impairment.	Injuries or illness requiring hospital admission.	Injury or illness resulting in permanent impairment.	Fatality
			Not Significant	Minor	Moderate	Major	Severe
Likelihood	Expected to occur regularly under normal circumstances	Almost Certain	Medium	High	Very High	Very High	Very High
	Expected to occur at some time	Likely	Medium	High	High	Very High	Very High
	May occur at some time	Possible	Low	Medium	High	High	Very High
	Not likely to occur in normal circumstances	Unlikely	Low	Low	Medium	Medium	High
	Could happen, but probably never will	Rare	Low	Low	Low	Low	Medium

Fig. 4.8 Risk probabilities and impact diagram

Risks can be prioritized for further quantitative analysis and planning risk responses based on their risk rating. Ratings are assigned to risks based on their assessed probability and impact. Evaluation of each risk's importance and priority for attention is typically conducted using a look-up table or a probability and impact matrix. Such a matrix specifies combinations of probability and impact that lead to rating the risks as low, moderate, or high priority.

In the following table (Fig. 4.9) it can see different shades that are:

Probability and Impact Matrix										
Probability	Threats					Opportunities				
0.90	0.05	0.09	0.18	0.36	0.72	0.72	0.36	0.18	0.09	0.05
0.70	0.04	0.07	0.14	0.28	0.56	0.56	0.28	0.14	0.07	0.04
0.50	0.03	0.05	0.10	0.20	0.40	0.40	0.20	0.10	0.05	0.03
0.30	0.02	0.03	0.06	0.12	0.24	0.24	0.12	0.06	0.03	0.02
0.10	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
	0.05/ Very Low	0.10/ Low	0.20/ Moderate	0.40/ High	0.80/ Very High	0.80/ Very High	0.40/ High	0.20/ Moderate	0.10/ Low	0.05/ Very Low

Impact (numerical scale) on an objective (e.g., cost, time, scope or quality)

Each risk is rated on its probability of occurring and impact on an objective if it does occur. The organization's thresholds for low, moderate or high risks are shown in the matrix and determine whether the risk is scored as high, moderate or low for that objective.

Fig. 4.9 Probability and Impact Matrix

- Dark grey area: represents high risk (the largest numbers)
- Medium grey area : represents low risk (the smallest numbers)
- Light grey area: represents moderate risk (with in-between numbers)

The risk score helps guide risk response. For example, risks which have a negative impact on objectives, otherwise known as threats. They are in the high-risk zone of the matrix, may require priority action and aggressive response strategies.

4.3.3 Risk Quantification

It is the process of numerically analysing the effect of identified risks on overall project objectives (Fig. 4.10). This process produces quantitative risk information to support decision making in order to reduce project uncertainty. This analysis is performed on risks that have been prioritized by the Qualitative Risk Analysis. In some cases, it may not be possible to execute the analysis process due to lack of sufficient data to develop appropriate models.

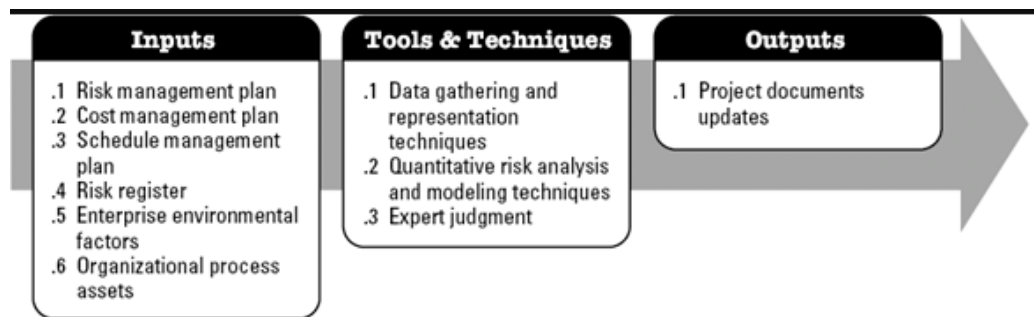


Fig. 4.10 Risk Quantification process

In the same way that Risk Identification, one of the techniques of gathering information are the interviews, in the Quantitative Risk Analysis also apply. Interviewing techniques draw on experience and historical data to quantify the probability and impact of risk on project objectives (Fig. 4.11).



Fig. 4.11 Quantify the probability and impact of risk diagram

Commonly used techniques use both event-oriented and project-oriented analysis approaches, including:

- **Sensitivity analysis:** helps to determine which risks have the most potential impact on the project. In addition, it examines the extent to which the uncertainty of each project element affects the objective being studied when all other uncertain elements are held at their baseline values.

- **Prioritized list of quantified risks:** this list includes those risks that pose greatest threat. These include the risk that may have the greatest effect on cost and those that are most likely to influence the critical path.

4.3.4 Risk Response

It is the process of developing options and actions to enhance opportunities and to reduce threats to project objectives (Fig. 4.12). Each risk response requires an understanding of the mechanism by which it will address the risk. Risk responses should be appropriate for the significance of the risk realistic within the project context, agreed upon by all parties involved...

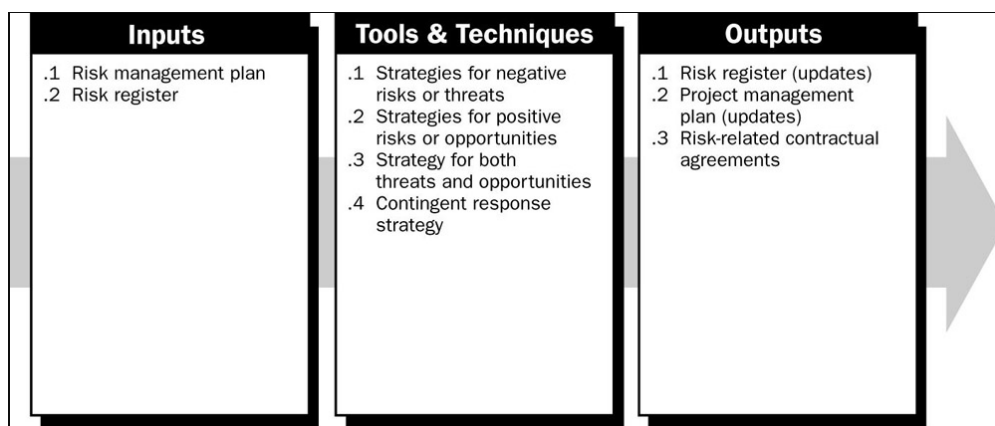


Fig. 4.12 Risk Response Process

Several risk response strategies are available. The strategy or mix of strategies most likely to be effective should be selected for each risk. Risk analysis tools, such as decision tree analysis, can be used to choose the most appropriate responses. Specific actions are developed to implement that strategy, including primary and backup strategies, as necessary.

Three strategies, which typically deal with threats or risks that may have negative impacts on project objectives if they occur, are: *avoid*, *transfer*, and *mitigate* (Fig. 4.13). Occasionally there is a fourth strategy that is *accepted*. These strategies should be chosen to match the risk's probability and impact on the project's overall objectives. Avoidance and mitigation strategies are usually good strategies for critical risks with high impact, while transference and acceptance are usually good strategies for threats that are less critical and with low overall impact.



Fig. 4.13 Strategies avoid, transfer, accept and mitigate

The four strategies for dealing with negative risks or threats are further described as follows:

- **Avoid:** it is a risk response strategy whereby the project team acts to eliminate the threat or protect the project from its impact. The most radical avoidance strategy is to shut down the project entirely. Some risks that arise early in the project can be avoided by clarifying requirements, obtaining information, improving communication, or acquiring expertise.
- **Transfer:** it is a risk response strategy whereby the project team shifts the impact of the threat to a third party, together with ownership of the response. Transferring does not mean disowning the risk by transferring it. Transferring liability for risk is most effective in dealing with financial risk exposure. Transference tools can be quite diverse and include.
- **Mitigate:** it is a risk response strategy whereby the project team acts to reduce the probability of occurrence or impact of a risk. Taking early action to reduce the probability and/or impact of a risk occurring on the project is often more effective than trying to repair the damage after the risk has occurred. Where it is not possible to reduce probability, a mitigation response might address the risk impact by targeting linkages that determine the severity.
- **Accept:** it is a risk response strategy whereby the project team decides to acknowledge the risk and not take any action unless the risk occurs. This strategy is adopted where it is not possible or cost-effective to address a specific risk in any other way. This strategy can be either passive or active. Passive acceptance requires no action except to document the strategy and to periodically review the threat to ensure that it does not change significantly.

4.3.5 Control Risk

It is the process of implementing risk response plans, tracking identified risks, monitoring residual risks, identifying new risks, and evaluating risk process effectiveness throughout the project. This process improves efficiency of the risk approach throughout the project life cycle to continuously optimize risk responses (Fig. 4.13).



Fig. 4.14 Control Risk process

The Control Risks process applies techniques, such as variance and trend analysis, which require the use of performance information generated during project execution. Also can involve choosing alternative strategies, executing a contingency or fall-back plan, taking corrective action, and modifying the project management plan

The risk register has key inputs that include identified risks and risk owners, control actions for assessing the effectiveness of response plans, risk responses, specific implementation actions, symptoms and warning signs of risk (Fig. 4.14).

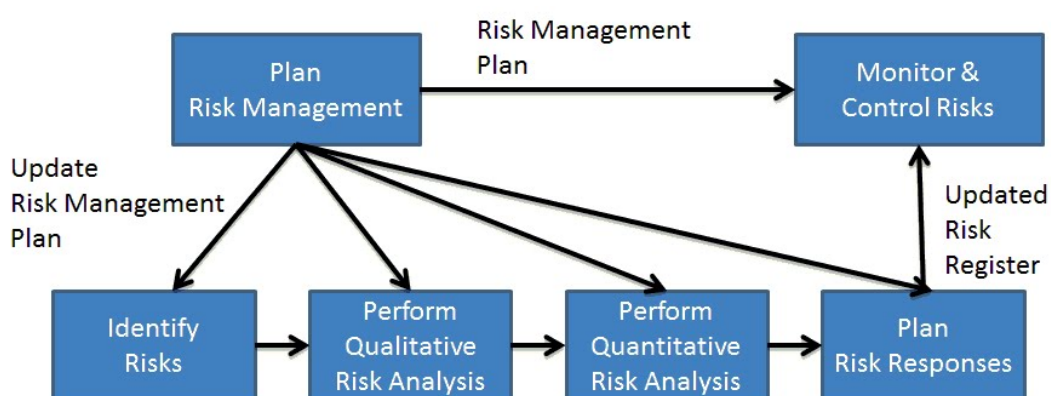


Fig. 4.15 Update the Risk Register Step by Step

Implementing contingency plans or workarounds sometimes results in a change request. Change requests are prepared and submitted to the Perform Integrated Change Control process. Change requests can include recommended corrective and preventive actions as well.

- **Recommended corrective actions.** These are activities that realign the performance of the project work with the project management plan. They include contingency plans and workarounds. The latter are responses that were not initially planned, but are required to deal with emerging risks that were previously unidentified or accepted passively.
- **Recommended preventive actions.** These are activities that ensure that future performance of the project work is aligned with the project management plan.

5. RISK MANAGEMENT IN TUNNELS

5.1 Introduction

There have been several attempts to tackle risks in tunnels in the recent times. British Tunnelling Society (BTS) worked with the Association of British Insurers (ABI) in order to produce a Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK (2003 last edition). Later on, the International Tunnel Insurance Group (ITIG) and the International Tunnelling Association (ITA) prepared the Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works (2012). [Alan N. Beard.2008]

Tunnel construction involves always risk. Risk in past times where main techniques where manual or by drill and blast were much higher than today. The main reason for this change relies in the use of TBM, which provide temporary support of the ground and reduces impact in neighbouring buildings and infrastructures. When the TBM construction technique is combined with high concrete quality precast lining systems results can be outstanding when proper design is provided and efficient installation methods are in place.

Consequently, in another document produced by the BTS called Tunnel Lining Design Guide risk management is strongly encouraged, at the same level of quality control. This can give an idea of the relevance of tunnel risk management in modern times.

A review on how the risk management is approached in tunnels is provided in this present section.

5.2 Tunnel safety

- Tunnel design and risk assessment

Quantitative risk assessment is coming to be used as part of tunnel safety decision-making. The use of quantitative risk assessment has the potential for leading to unacceptable designs. It is necessary to adopt a broad perspective and be aware of the possible pitfalls of risk assessment. Beyond that, quantitative risk assessment may then be composed of deterministic risk assessment or non-deterministic risk assessment, or a mixture of the two.

When shifting to an approach which includes risk assessment the following questions arise: [Alan N. Beard.2008]:

- Which methodology should be used? What are to be the criteria for acceptability?
- How to assess the risk and make a decision?
- What are to be the criteria for acceptability of risk? this is basically an ethical decision, not a technical one, as such the criteria need to be generally acceptable to the public.

5.3 Code of Practise for Risk Management of tunnel works

This code has been based on 'The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK' which was prepared jointly by the British Tunnelling Society and the Association of British Insurers and published by the British Tunnelling Society in September 2003. [Wannick, H. (2006)]

The objective of this Code is to promote and secure best practice for the minimisation and management of risks associated with the design and construction of tunnels, among others aspects. It sets out practice for the identification of risks, their allocation between the parties to a contract and Contract Insurers, and the management and control of risks through the use of Risk Assessments and Risk Registers.

This code as it applies to construction projects involving Tunnel Works should minimise the risk of physical loss or damage and associated delays.

The relevant best practices that the Code gives are the following:

- Risk assessment and management
- Client role and responsibilities
- Project development stage
- Construction contract procurement stage
- Design stages
- Construction stage

ITA supports the principles and the spirit of the use of Risk Management and generally agrees with the principles of the code. ITA supports ITIG in this initiative to ensure that Risk Management principles are incorporated into the implementation of tunnel and underground projects. [Wannick, H. (2006)]

5.4 British Tunnelling Society (BTS) recommendations

The need for a single reference of recommendations and guidance for tunnel lining design has been recognised for a number of years. Hitherto, designers have adopted a variety of approaches based on practical experience of tunnels built in similar circumstances and on research carried out both on mathematical and physical scale-models, either undertaken by the designers themselves or which have been presented in published papers. [BTS. (2004).]

The British Tunnelling Society (BTS) considered that the valuable knowledge and experience of its members on tunnel lining design should be made available to the wider international underground construction community, and that a published guide was an appropriate medium.

The Guide is drafted for particular use in conjunction with relevant United Kingdom Standards, Codes of Practice, customs and practice (see Bibliography and section references). Such existing Standards and Codes are usually not specific to tunnelling, and have no formal standing in tunnel lining design, so this document carries new information and guidance. [BTS. (2004)]

About Risk Management this Guide is appropriate for particular projects and for adjusting such information to the particular circumstances of the project.

The existence of regulations and guidelines does not relieve the designer of the responsibility to design a lining competent for a particular circumstance. Although regulations must be complied with, they do not absolve designers of their overall professional responsibilities. Designers of tunnels, and any other type of construction work, are required by legislation to consider matters of occupational health and safety. This legislation arises out of a

1992 European Directive, which was translated into UK health and safety legislation by means of the creation of [BTS. (2004)]:

- Construction (Design and Management) Regulations 1994
- Construction (Health, Safety and Welfare) Regulations 1996.

The British Tunnelling Society and the Association of British Insurers have jointly issued this Code of Practice in order to promote and secure best practice for the minimisation and management of risks associated with the design and construction of tunnels and associated underground structures including the renovation of existing underground structures. It sets out practice for the identification of risks and their allocation between the parties to a contract and contract insurers, and the management and control of risks through the use of Risk Assessments and Risk Registers. [BTS (2004)]

Realistically, not all risks can be avoided on a project and the detailed design should be developed on the basis of reducing risks to 'As Low As Reasonably Practical', that is, the ALARP principle.

Regarding technical risks design should:

- Ensure that there are no inherent structural defects which could lead to catastrophic failure
- Have deformations contained so that the structure is not overstressed
- Have material strengths of load-bearing elements maintained for the design life
- Have support system capacity that is not exceeded if time-dependent behaviour or other long-term effects are experienced
- Provide durability throughout the design life
- Control groundwater inflows and/or outflows from tunnels under internal pressure
- Evaluate constructability requirements, for example ensure that erectors for segmental linings will not cause damage to the lining

Some aspects of a design can be difficult to quantify, and local practices and materials may affect the issue of robustness. Quality control is also important and many residual risks can be eliminated through the use of management systems that build in check and procedures targeted at those risks. Safety-related problems sometimes involve human error and a robust design will include a consideration of this factor.

In order to facilitate the implementation of risk management in tunnels, BTS proposes an Appendix on Risk Management which complements his Design Guide. This appendix is based on simple questions and answers together with Tables and forms. For example in the case of preparation of risk register the following questions are raised: what can go wrong?, how likely it is?, what measures are required to mitigate the chance of something going wrong?, who is responsible for managing it?, who is vulnerable if something does go wrong?, when risk management actions need to be carried out?

The Appendix includes also some guidelines in order to elaborate a risk list, which is shown in Fig. 5.1 below.

Contract documents and company relations <ul style="list-style-type: none"> • client – past working relationship • customer's expectations • sub-contractor/suppliers – competence, past working relationship • contract conditions • payment terms • scope of works • risk allocation – (e.g. ground risk) • past design and build working relationship • responsibility/authority boundaries • communication lines • handling information • sensitivity to change (cost and time, alternative approaches) Staffing <ul style="list-style-type: none"> • staffing requirements • relevant experience • expertise involved at appropriate stage • limitation of knowledge/expertise • use of in-house specialists Third parties and sensitivity <ul style="list-style-type: none"> • Third party involvement • reliance on other parties • adjacent structures and services • public involvement/concern • location • environmental issues • aesthetics of finished work • noise • vibration Approvals <ul style="list-style-type: none"> • access • regulations – environment, safety • planning consents, licences • client approvals • waste management/minimisation 	Ground conditions <ul style="list-style-type: none"> • assessment of desk study, site investigation, interpretative report (are they adequate?) • geological environment – potential variability, potential hazards • hydrogeology – seasonal changes, long-term changes • groundwater control • contamination • soil/structure interaction issues • ground/structure movement • earthworks Design <ul style="list-style-type: none"> • clear, unambiguous design brief • serviceability criteria • innovations or proven technology/methods/materials • design interfaces • adequacy and reliability of incoming data • unforeseen mechanisms • robustness of solution – design, workmanship, assumptions Construction <ul style="list-style-type: none"> • past experience with proposed methodology • on-site verification/problem identification • buildability • maintenance • innovations or proven technology/methods/materials • instrumentation/monitoring • construction interfaces • feedback to verify design assumptions • potential for observational method • influence of changes to ground conditions • temporary works Programme <ul style="list-style-type: none"> • sequencing of works • time available • access constraints • availability of staff/specialist plan
--	---

Fig. 5.1 Prompt list for threat and opportunity identification

The process of tunnel risk management is presented in Fig. 5.2. The stages considered are:

1. Threat/opportunity identification
2. Assessment of likelihood
3. Consequence analysis
4. Consider options for reducing risk
5. Identify and manage chosen risk mitigation strategy
6. Review and reconsider at regular intervals, especially if new information becomes available

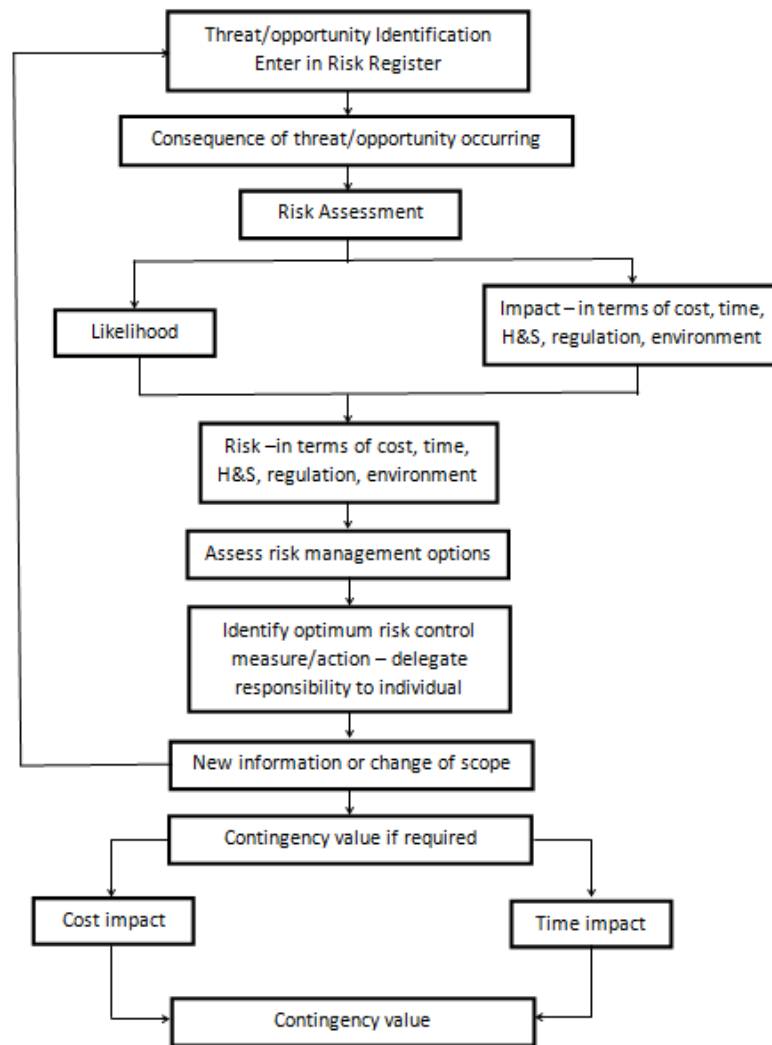


Fig. 5.2 Tunnel Risk Management Process

The process of risk management implementation prepared in this document does not follow exactly the BTS guidelines, mainly because the risks associated to the ground are much limited when using a TBM. In particular the scoring proposal is mostly impacted by this fact and it is not included here. However it is consistent with its principles.

Fig. 5.3 shows a Risk Register Form recommended by BTS:

Project Hazard Inventory

Project Title			Project No.			Project Manager			
			Division			Project Safety Co-ordinator			

(1) Hazard Ref.	(2) Hazard	(3) Cause	(4) Initial risk level			(5) Design action taken?		(6) Mitigation measures	(7) Final risk level
			Probability	Severity	Risk	Yes	No		
1									
2									
3									
4									
5									

Fig. 5.3 Risk Register Template

6. APPLICATION TO A SPECIFIC PROJECT

6.1 Introduction

Risk analysis has been carried out for a Middle East railway project, which is currently under construction. The project is expected to be in service at 2019, including different tunnel sections executed with TBM.

Selection of this project must be elaborated. Principal obstacles associated with tunnels are the risks of accidents during construction, and tunnel linings are relevant players against most of these unexpected events. Consequently, large world class infrastructure projects such as tunnels include Risk Management as one of the standard processes on how to manage them.

Following the classical division of projects, there can be risks at design, construction and operation stage. Design risks have normally smaller impacts than those of construction, and can be easily mitigated with current management processes.

TBM excavation represents a big investment in an inflexible but potentially very fast method of excavating and supporting a tunnel, but unfavourable conditions are encountered without warning, time schedule and practical consequences are often far greater in a TBM driven tunnel than in a drill and blast tunnel. This is the first risk which must be assessed properly due to its huge impacts.

Consequently, design and construction planning must be based on a risk management approach with contingency procedures and criteria developed to allow the risks to be managed effectively as the TBM is progressing.

Construction of linings for tunnels involves major risks, particularly in the case of TBM tunnels, because the lining is itself the structural element actually resisting the loads created by the underground conditions. While temporary support is being provided by the TBM through cutter head and the shield itself in order to avoid uncontrolled settlements in surface or affections to buildings and infrastructures, the permanent support is the lining, understood as the ensemble of precast rings and injected grout acting jointly with the surrounding ground.

Other to these risks associated specifically to the excavation and temporary support itself, the lining risks can be broken down considering the fabrication of the segments, their handling, storage and transportation, the assembly and injection of the rings into the confined space inside the tunnel, as well as those produced by later construction activities performed to the lining in order to finalize the tunnel itself.

The study will apply to the construction of tunnel with TBM where the linings were performed with precast concrete segments. It consist of a circular arc with inner radius is 4350mm and the thickness is 350mm. The precast segments rings are comprised of five rhomboidal and one trapezoidal segments plus the key segment (Fig. 6.1).

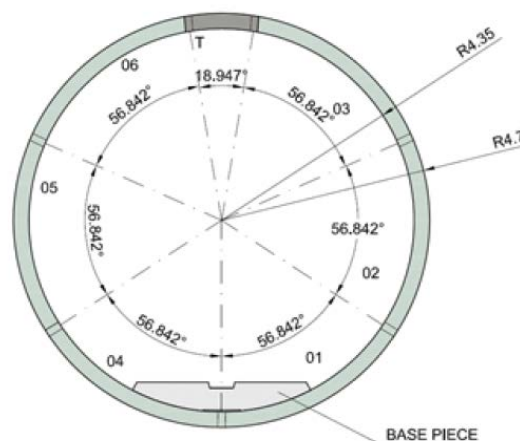


Fig. 6.1 Ring cross section

This chapter will focus on the risk identification and their subsequent both Qualitative and Quantitative analysis, designed from the data obtained by surveys of experts who have contributed to this project.

First the life cycle of the precast segments with their respective risks is considered, taking into account all stages such as fabrication, handling, storage and transportation of the segments, assembly of the segments in order to produce the rings which are successively constructed, and finally finishing activities until delivery of the tunnel.

6.2 Interviews

This section also explains a work method that has been followed for the necessary information collection for the subsequent risk analysis. Reviewing all available literature information on previous studies, significant basic parameters which may lead to risks on the precast segments have been identified.

After studying and analysing the process defined in previous sections , a series of questions have being raised about the most relevant aspects related to specific risks in construction tunnels with lining with precast segments. These questions are the basis of the assessment performed in this work.

However, this a priori state of the art prepared starting from relevant bibliography is not enough to perform a comprehensive risk assessment. It is necessary to objectivise the study by using a recognized method, which in this case is the expert judgement in order to complement the information gathering techniques previously referred.

Consequently the critical aspects were translated to a set of questions grouped in a logical way in order to permit expert judgement based in the experience and knowledge of different civil, structural and geological engineers who have generously agree to participate in this project.

Risk assessment is therefore carried out by means of a structured questionnaire which summarizes those questions. The interviews were conducted experienced technicians in the project disciplines and were submitted to them and discussed in person and when it was not possible by mail. The questionnaire is annexed to this document in the Annex.

6.3 Identify Risks

Identify Risks is the first step in the risk analysis. The methodology consists in determining risk that may affect the project and documenting their characteristics (Fig. 6.2).

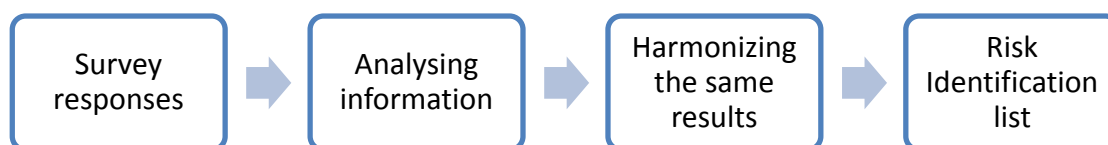


Fig. 6 2 Integration from Risk Identification

The technique used for the collection of data, in this case, has been to conduct surveys, preferably by one-on-one interviews with experienced participants in the field of the project, interested and experts in the field. Interviews with different experts consulted have also provided to identify the most significant risks during the different stages of the precast segment. Interviews are annexed to this document in the Annex.

The number of submitted surveys was twelve, out of which some eight surveys were answered. It should be noted that respondents include a wide range of experts in the field of design, construction, project management of tunnels executed with TBM, as well as academics specialists.

By analysing the information of the eight surveys which were answered, a total of eighties answered were obtained. Which each other, some correspond to the same phenomenon and others were totally different. Therefore it was decided to harmonize the results by examining which results corresponded to the same phenomenon, consulting these aspects with the tutor. So it was converted from eighties answered to forty-eight in total. All answers are also annexed to this document in the Annex.

According to the analysis of the surveys responses, a list of identified risks it was prepared. The identified risks were described in as much detail as is reasonable. All risks identified have been reported because they should be recorded and used to support future risk identification for others projects

Therefore, harmonizing risk identification at all stages of precast segment in the survey are the following (Table. 6.1):

DESIGN

1. Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situation
2. The security coefficient has not been correctly adjusted
3. Calculation model has not been really adjusted
4. Conservative design for service situations
5. Appropriate calculation models
6. Incorrect assessment at stages of service (ground ignorance, groundwater level, possible disruptions in the tunnel)
7. Changes at entrance in the calculation parameter when it has been carried out
8. Ring break for ground pressure and transmitted pressures by advance cylinders.
9. El modelo de la puesta de empuje de los gatos hidráulicos
10. Structural and geometric risks
11. Not meeting the expectations
12. Calculation error
13. Not realistic ring
14. It is often unwieldy by the workers

PRODUCTION

1. Concrete curing process
2. Manufacturing tolerance in precast segments
3. Concrete design
4. Concrete quality
5. Inexperience (execution /mould)
6. Problem with the aggregates
7. It is often unwieldy by the workers

HANDLING AND STORAGE

1. No having foreseen in the design the manipulation that really is being done
2. Dynamics actions in transport
2. Changes in staff
3. Add efforts to precast segments which are not ready
4. Appropriate resistance after the production
5. Bad manipulation

MANAGEMENT

1. Do not correctly shape the precast ring segment
2. Joints articulate weakest point the precast ring segment
3. Joints may be subject to impacts because they are the edges of precast segment
4. Bad contact between joints, it may have water filtrations
5. Forced placement of the precast segment
6. Precast segment placement at the top could have a light overture
7. Pressure by hydraulic jacks may affected precast segment

**ACTIVITY FINALISATION**

1. Precast segment are not prepared to withstand the forces
2. Drill precast segment batter part
3. Groundwater contact
4. Incorrect inject the filling behind tunnel linings
5. Down movements when loads are applied, settlement
6. No planning intermediate works

SERVICE STATE

1. Tunnel modifications or it environment (landfill or close excavation)
2. Ovalization changes by the ground actions (landfill, close excavation or groundwater variation)
3. Water filtrations
4. Repairs after the works have been delivered
5. Wrong precast segment placement
6. Fire

PROCESS

1. Handling and storage
2. Handling
3. Management

Table 6.1 Harmonizing Risk Identification list

6.4 Qualitative Risk Analysis

Once all risks by experts were identified, the following qualitative analysis was carried out. This analysis prioritised risk assessed and probabilistic and impact combination (Fig. 6.3).

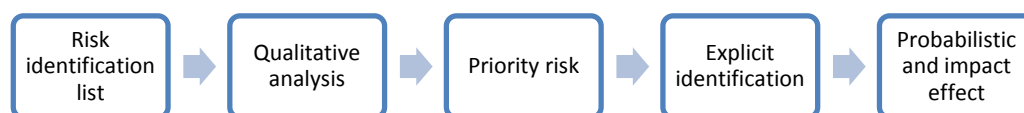


Fig. 6.3 Integration from Risk Qualitative

The priority of identified risk was performed by using their relative probability or likelihood of occurrence. Risks were also assessed through surveys performed. Therefore, the prioritised risks have been identified in the majority of surveys by considering the most frequent answered. In this case, Risk identification list was reduced from forty-eight answered to fourteen in total.

Then, the list shown here corresponds to priority risk which will give rise to the following analyses (Table. 6.2):

DESIGN
1. Conservative design for service situations
2. Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situation
PRODUCTION
3. Concrete curing process
HANDLING AND STORAGE
4. Dynamics actions in transport
5. Changes in staff
6. No having foreseen in the design the manipulation that really is being done
MANAGEMENT
7. Do not correctly shape the precast ring segment
8. Joints articulate weakest point the precast ring segment
9. Forced placement of the precast segment
ACTIVITY FINALISATION
10. Precast segment are not prepared to withstand the forces
11. Incorrect inject the filling behind tunnel linings
SERVICE STATE
12. Water filtrations
13. Repairs after the works have been delivered
PROCESS
14. Handling and management

Table 6.2 Priority Risk Qualitative list

Effective assessment therefore requires explicit identification and management of the risk approaches. So is defined the possible cause of the priority risk. Priority risks are discussed below in more detail.

- **Conservative design for service situations:** The design is conservative because you do not really know the cases of temporary loads.
- **Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations:** Actions occurring in manufacturing process, collection, management, push phases that were not taken into account.

- **Concrete curing process:** Depending on the acceleration inside the camera. If the acceleration is not enough, we will have problems with the concrete strength. If the acceleration is too long, the manufacturing process is not optimum.
- **Dynamics actions in transport:** Vibrations that cause in both transport and handling may take place fissures.
- **Changes in staff:** Each project is different and each country has different work philosophy.
- **No having foreseen in the design the manipulation that really is being done:** Actions occurring in manufacturing process, collection, management, push phases that were not taken into account.
- **Do not correctly shape the precast ring segment:** Precast ring segment is not with proper regularity
- **Joints articulate weakest point the precast ring segment:** Main route for water inlets
- **Forced placement of the precast segment:** Inexperience of management or logistic plans
- **Precast segment are not prepared to withstand the forces:** Actions occurring in manufacturing process, collection, assembly, push phases that were not taken into account.
- **Incorrect inject the filling behind tunnel linings:** Well control with TBM while working in EPB Earth Pressure Balance
- **Water filtrations:** Main route for water inlets
- **Repairs after the works have been delivered:** All the repairs that make the tunnel finish are not the right ones
- **Handling and management:** Stages in which more cases can occur that have not been evaluated in the design for example due to environmental loads

As of the risk priority detail description, in this analysis is assessed the risk probability and impact also. Establishing definitions of the levels of probability and impact can reduce the influence of bias. An evaluation of the quality of the available information on project risks also helps to clarify the assessment of the risk's importance to the project.

Risk probability assessment investigates the likelihood that each specific risk will occur. Risk impact assessment investigates the potential effect on a project objective. Both are assigned using qualitative scale, which are already prepared to satisfy the objectives and the restrictions in the project.

The assessment of the probability and impact of the most relevant risks is characterized by evaluating in relation to the level of probability and impact. The order is from high to low (Table. 6.3).

	IMPACT	PROBABILITY
1. Conservative design for service situations	High	-
2. Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations	High	Average
3. Concrete curing process	Short	Short
4. Dynamics actions in transport	Short	Short
5. Changes in staff		
6. No having foreseen in the design the manipulation that really is being don	Short	Short
7. Do not correctly shape the precast ring segment	Short	Short
8. Joints articulate weakest point the precast ring segment	High	High
9. Forced placement of the precast segment	Short	Short
10. Precast segment are not prepared to withstand the forces	Short	Short
11. Incorrect inject the filling behind tunnel linings	Short	Short
12. Water filtrations	Average	Average
13. Repairs after the works have been delivered	Short	Short
14. Handling and management	Average	Average

Table 6. 3 Impact and probability of success of the assessed risks

6.5 Quantitative Risk Analysis

Quantitative Risk Analysis is the process of numerically analysing the effect of identified risk on overall project objectives. Numerical analysis has been made only to the priority risk list (Fig.6.4).

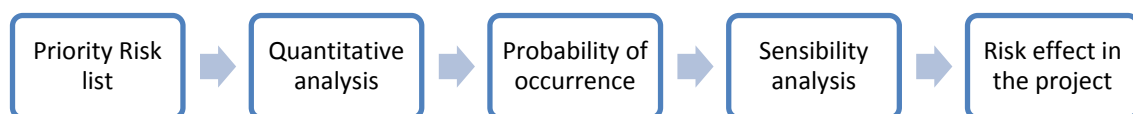


Fig. 6 4 Integration from Risk Qualitative

Probability during uncertain situations can be changed to risky situations by the assignment of subjective probabilities. There are some good reasons why subjective probabilities may be not only quite acceptable but even preferable to objective probabilities.

- Objective probabilities are determined based on some experimental opinions or objective. It is calculated by taking the quotient between the number of favourable cases and the number of possible cases.
- In addition, subjective probabilities refers to the probability of occurrence of an event based on previous experience, personal opinion or intuition. After studying the available information, a probability value is assigned to events based on the degree of belief the event may occur.

Once you have done the analysis you can see that the subjective probabilities of different individuals with the same experience and information may be very different.

Once the surveys are done with experienced people they have some equal and different subjective probabilities. Even if they have the same information and experience, their opinion in certain situations is different.

Therefore the probability of occurrence of that risk has been calculated in the different surveys carried out.

The following table has been used to calculate the probability of occurrence (Table. 6.4)

	Very Low	Low	Moderate	High	Very High
Probability	VeryLowProbability 0 to 10%	LowProbability 11% to 30%	Medium Probability 31% to 50%	High Probability 51% to 80%	Very High Probability 81% to 100%

Table 6. 4 Probability levels

The order of importance of the risks has been guided by two criteria: how many times the risk phenomenon has been answered in all surveys and the probability and impact on the project objectives. In other words, if a risk was identified in some surveys, this implied that the it is highly likely that happens. Therefore the impact and the probability is higher.

Finally, the order of importance of the risks is the following (Table. 6.5):

TITLE	ORDER OF IMPORTANCE	PROBABILITY
Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations	87,5%	Very High
Conservative design for service situations	75%	High
Handling and management	62,5%	High
Dynamics actions in transport	50.0%	Moderate
Do not correctly shape the precast ring segment	50%	Moderate
Joints articulate weakest point the precast ring segment	50%	Moderate
Concrete curing process	37.50%	Moderate
Water filtrations	37.50%	Moderate
Repairs after the works have been delivered	37.50%	Moderate
Changes in staff	25%	Low
Forced placement of the precast segment	25%	Low
Precast segment are not prepared to withstand the forces	25%	Low
No having foreseen in the design the manipulation that really is being done	12.5%	Low
Incorrect inject the filling behind tunnel linings	12.5%	Low

Table 6. 5 Order of importance of the risks

Sensitivity analysis helps to determine which risks have the most potential impact on the project. Conversely, it examines the extent to which the uncertainty of each project element affects the objective being studied when all other uncertain elements are held at their baseline values. This list includes risks represent the greatest threat to the project. Greatest threat risks have been considered those whose pass the 50% of the probability of occurrence, by assessing those where experts have agreed more often.

With the information gathered, finally risks identification qualitative and quantitative reduced list consists in the following (Table. 6.6):

Title	Order of importance	Probability
Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations	87,5%	Very High
Conservative design for service situations	75%	High
Handling and management	62,5%	High
Dynamics actions in transport	50.0%	Moderate
Do not correctly shape the precast ring segment	50%	Moderate
Joints articulate weakest point the precast ring segment	50%	Moderate
Concrete curing process	37.50%	Moderate

Table 6.6 Risk analysis, greatest threat

"To try to eliminate risk un business enterprise is futile. Risk is inherent in the commitment of present resources to future expectations. Indeed, economic progress can be defined as the ability to take greater risk"

Hertz and Thomas (1984)

Quantifying the impact of risk is mainly done to quantify is consequences in terms of project time and cost from different perspectives. That is, to quantify how a potentially critical event, whose likelihood of occurrence is described by a probability, can impact the cost of the project reference to a best-estimate base cost. Because the estimate of future project cost involves substantial risks, the substantial should also be included in the cost-estimating process.

6.6 Plan Risk Response

The last process is developing options and actions to enhance opportunities and to reduce threats to project objectives (Fig. 6.5).

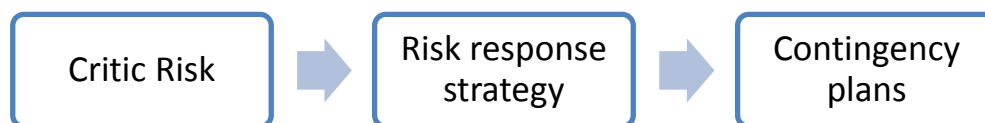


Fig. 6 5 Integration from Risk Response

Each risk response requires an understanding of the mechanism by which it will address the risk. Risk responses should be appropriate for the significance of the risk, realistic within the project context and owned by a responsible person. Selecting the optimum risk response from several options is often required.

Several risk response strategies are available. The strategy or mix of strategies most likely to be effective should be selected for each risk. Three strategies, which typically deal with threats or risks that may have negative impacts on project objectives if they occur, are: avoid, transfer, and mitigate.

In this case, it has been used mitigate strategy because is one of the most effective from critic risks. Mitigation may require prototype development to reduce the risk, for the more time pass worst it.

Some groups of measures are predefined for to being systematic techniques implementing in the different stage of the project, so that reduce each of them.

Risk responses identified using this technique are often called contingency plans or fallback plans and include identified triggering events that set the plans in effect.



In the study, contingency plans have been studied only for those priority risk, which were identified after qualitative and quantitative analyses. Therefore, each of the risk should be associated with a contingency plan, which pretends to implement specific measures in the case the risk has been materialized. Proper identification of the triggers of for these risks should be studied.

It is frequent to mix the concept of risk mitigation with that of contingency measures or contingency plans. Consequently both concepts will be elaborated with more detail in the coming paragraphs.

Therefore, once the risk have been analysed and quantified as well as the risk impact on the project objectives, appropriate measures are selected and applied in order to modify, reduce or eliminate the risk. These are mitigation measures or mitigation plans.

The most correct strategy for mitigation must be defined by analysing the importance and relevance of risk on the project objectives. Therefore, three types of level risk are distinguished (Fig. 6.6):

- Low level risk: the project members can accept the risk, additional action may not be necessary, although control and monitoring are required.
- Medium level risk: the risks must always be treated and controlled, and their acceptance or not, will respond to the strategy of the project members.
- High level risk: the risk will require careful management, as well as the specific plans preparation to manage and correct possible consequences.

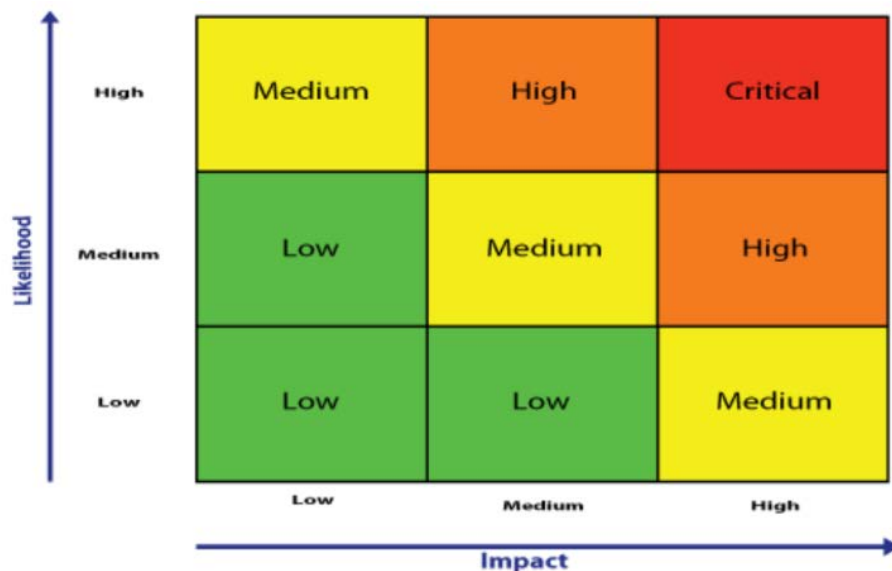


Fig. 6.6 Three types of level risk

Mitigation measures or mitigation plans are different of contingency measures (Fig. 6.7):

- Mitigation Measures: it consists in minimize the likelihood that the risk will be present, in others words, to act proactively in order to try that the risk will never be materialized, and the accident does not take place. This measures are implemented by the strategies of avoid, transfer, mitigate and accept are used.
- Contingency measures: it consists in implementing corrective or contingency measures when the risk has been materialized, and has become an issue or an incident. This is a reactive strategy which is triggered when the issue or incident has taken place. The contingency measures are used when the mitigation measures haves failed, and the risk has actually take place. In these cases, Contingency Plan must be consider, which try to reduce the negative effects, when the risk has occurred.



**Avoid Risk = Lower Profits =
Lost Opportunities
(Risk Averse)**

Fig. 6 7 Mitigation measures plans

With the results of the analysis a second round of discussions with the relevant specialists took place, with the support of professors of the University and the tutor. The objective of these discussions was which risk strategy was more suitable in order to tackle with those risks.

Therefore the results for each risk and its classification as per the four categories of mitigation strategy (avoid, transfer, mitigate and accept) are the following:

Mitigation measures:

i. Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations

- a. Study the whole life cycle of precast segment.
This is a mitigation strategy. More studies are needed in order to minimize the risk due to lack of comprehensive knowledge
- b. Integrate TBM design with the design of both precast segment and precast segment factory
This is a mitigation strategy. Improvement on the management process is needed in order to minimize the risk due to lack of adequate integration

i. Concrete curing process

- a. Control of strength acceleration to be the optimum.
This is a mitigation strategy. More studies are needed in order to minimize the risk due to lack of comprehensive knowledge of the real process of strength gain
- b. Control curing through data collection if possible.
This is a mitigation strategy. More studies are needed in order to minimize the risk due to lack of enough data available

i. Handling and management

- a. Logistics plan considering the precast segment movements at factory, storage yard and transportation to be defined.
This can be mitigation or transfer strategy. Considering that putting in place a logistic plan in order to minimize the risk is clearly a mitigation strategy. But if the factory is subcontracted the risks can be completely transferred in terms of management
- b. Requirements for handling and management to be strictly disseminated in site (for example through method statements).
This is a mitigation strategy. A better communication and training is needed in order to minimize the risk due to lack of skills in the staff

i. Dynamics actions in transport

- a. Study of the actual resistances at an early age during precast plant implementation.
This is a mitigation strategy. More studies are needed in order to minimize the risk due to lack of comprehensive knowledge
- b. Define and consider minimal required strengths in the calculation also during the design.
This is to avoid strategy. For instance all segments not reaching the required strength can be rejected throughout quality controls
- c. Avoid the use of mechanical forklift and prefer bridge crane (in order to reduce or suppress vibrations).
This is to avoid strategy. Not forklifts allowed to be used

i. Do not correctly shape the precast ring segment

- a. Tolerances established in formwork for precast segment
This is a mitigation strategy. If tolerances are respected then the risk of having uneven contacts is reduced
- b. Staff training
This is a mitigation strategy. Risk can be minimized if adequate training is provided
- c. Develop precast segment design which favours a better finish (trapezoidal form).
This is a mitigation strategy. More studies are needed in order to minimize the risk by development improved shapes .

ii. **Conservative design for service situations**

- a. As is unavoidable the only thing that can be done is accepted and considered in the cost. Currently risk strategy is to accept, provided there are standards which govern the design and must be respected.
This is to accept strategy.

ii. **Joints articulate weakest point the precast ring segment**

- a. Use centering cones instead of bolts
This is a mitigation strategy. When replacing bolts which can fail the risks of bad joints behaviour is reduced
- b. Use doubles ealing gasket
This is a mitigation strategy. Risk of bad behaviour of the joint in terms of waterproofing is reduced when using double gasket
- c. Investigation how to improve water proofing

This is a mitigation strategy. Risk of bad behaviour of the joint in terms of waterproofing is reduced when a better knowledge of the process is achieved

Once you complete this process of Plan Risk Response (Contingency measures), various information documents of the project are updated in the risk register. This way, risks judged to be of low priority are included in a watch list for periodic monitoring. The risk register should be written to a level of detail that corresponds with the priority ranking and the planned response.

In addition, several recommendations obtained from experts answered in the surveys are presented. These recommendations are annexed to this document in the Appendix.

6.7 Contingency Measures

In the previous section the response to the risks has been formulated in terms of risk mitigation. It must also be defined (Table. 6.8)

Title	Contingency measure
Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations	Stop fabrication, redesign and implement the new design. In parallel a reparation process for unsafe lining section and segments must be put in place
Concrete curing process	If the concrete curing process is not enough to reach the required strength, then the contingency measure is to wait more time during storage stage
Handling and management	If this risk materialises, then the contingency measure is to prepare a new logistic plan and implement it in order to avoid it happens again
Dynamics actions in transport	If not considered dynamic actions take place, damage assessment of the segment already casted must be performed and reparation or rejection defined. Also transportation plan must be revisited and updated
Do not correctly shape the precast ring segment	When the errors in the shape of the segment are relevant, the only advisable solution is to reject them, as well as to assess any damage produced in the lining already constructed in order to define reparations. In case the magnitude of this error is minor then a modification of the assembly process by reducing applied thrust loads can be studied if feasible
Conservative design for service situations	In case the design is proved to be very conservative and there is enough technical substantiation, redesign can take place together with the request of relaxation if needed
Joints articulate weakest point the precast ring segment	Failures in joints contingency plan relies in repairing them through special injections in the affected area

Table 6. 7 Contingency measures

Fig. 6 8

The results for each risk and its classification as per the four categories of mitigation strategy (Table. 6.9)

Title	Avoid	Mitigate	Transfer	Accept
Ignore or disregard cases of temporary loads and transitory situations		X		
Conservative design for service situations				X
Handling and management		X	X	
Dynamics actions in transport	X	X		
Do not correctly shape the precast ring segment		X		
Joints articulate weakest point the precast ring segment		X		
Concrete curing process		X		

Table 6. 8 Risk Classification

7. CONCLUSIONS

7.1 Introduction

From the analysis carried out, a series of conclusions are extracted which refer both to the risk management process and mitigation plans identification related to, for the risk management of construction of TBM tunnel lining with precast segments.

It has to be emphasized that the conclusions that which are proposed in this documents can vary considering in general in each particular cases considering some should be study all the tunnel details, This fact is much more evident when talking about contingency measures, which for sure must be influenced, to be able to particularize the risks for specific cases, because depending on each philosophy of work may some correct measures vary in one case or other.

7.2 Conclusions

The conclusions obtained from the study carried out refer both to the Risk Management process and the Risks in design and construction of TBM concrete precast linings.

Conclusions about Risk Management:

- Tunnels and in general underground constructions suppose a high interaction with the environment, which in this case is hardly accessible a priori and therefore unknown. Therefore a suitable risk management strategy is obligatory for the contractor, the property and the construction management.
- While the tunnels executed with TBM significantly reduce the risks for buildings and infrastructures and for the workers in the construction of them, the selection and design of TBM appear as critical and may affect to the success of the project. Consequently inclusion of TBM related risks must be considered for future research.
- Even though the tunnel lining executed with TBM is a highly industrialized technology, there are still gaps of knowledge not sufficiently resolved that could lead to unforeseen risks and accidents.
- Tunnel specialists working with TBM should have typical risk management studies in which mitigation strategies and contingency measures are clearly defined.
- The risk inherent in this type of projects can be much better managed in the measure that there is a better interaction between the design and the construction, today not integrated enough.
- In order to increase efficiency in the construction of this type of tunnels it is important to document the lessons learned in each project, within a general system of knowledge management.
- Risk management appears to be almost unknown in our local civil engineering environment, and must be disseminated as a tool for large infrastructure projects.

Conclusions about risk associated to design:

- The temporary loads or transient situations are not sufficiently studied in some cases, and consequently it would be advisable to study the life cycle of the precast segments, because in this way they will be able to identify all those loads or situations may affect the precast segment. Likewise it is necessary to establish a balanced collaboration between the designers, engineers of the TBM and the precast segment factory, because if the balance is reached between each part it will be easier to identify the key points of the loads and transient situations that is not taken into account.
- With regard to the conservative design for situations in service, the only available mitigation strategy is acceptance, and non-contingency measures can be expected. Throughout the constructive projects, as experience grows the designs are becoming increasingly optimized. It is true that in the precast segment design there is overabundant reinforcement because of the minimum reinforcement criteria: this must be reviewed in the case of highly industrialised precast segments. Although the thickness can be optimized according to calculations, there is a minimum ratio related with the precast segment stability in the assembly.

Conclusions about risks associated with construction:

- It is important to control the acceleration in the curing process so that it is optimal, that is, to obtain the appropriate resistances at early age. If the resistance is not right a number of incidents such as cracking of the segments can be triggered. Equally important is the natural curing in the storage yard, because depending on the weather conditions (very cold places or very dry places) these can affect the segments more easily if the curing of the precast segment is not adequate.
- Handling and storage of precast segments is a delicate process because the precast segments have not developed all strength yet. Wrong movements or application of overloads in the precast segments may favour the appearance of cracks or breaks.
- Quality of the assembly remains a major risk, which can compromise the objectives of the project. Segments casted out of tolerance can lead to be placed in a forced way or to produce unexpected loads. Poor finishes, cracks or leakage can also take place..
- One of the most critical points in the union between rings and between precast segments of the ring are the joints. In this connection point, it must be ensured that the seals maintain the waterproofing, especially in the long term, and that ring resist the thrusts of the ground without excessive deformation. Modern systems have improved seals to waterproof joints between rings and between precast segments. It is important to have a good seal to avoid water filtrations as it is one of the most damaging cases which can have. Also in this way the efforts are better and not concentrated in a single point.

7.3 Future research lines:

As result of the preparation of this document, several suggestions for future research have been found, related with aspects in different fields which may contribute to significant improvements in the construction of tunnel linings with precast segments. These points are listed below:

- Although precast segments with metal fibers are being more frequently used across time, it is still a new field in some aspects. So it would be one of the lines of interesting research improvements in the future.
- Risk Management is a strategy that is being implemented in world class projects, but it is still a long way for all work philosophies to be complemented by this strategy. Therefore, a line of interesting research improvements for the future would be to be able to investigate more in risk management and its relationship with specific local construction approach.
- Knowledge management on risks, particularly related with tunnels must be developed by promoting and encouraging lessons learned. This applies also to all those projects in which risk management has been applied.

8. BIBLIOGRAPHY

8.1 BIBLIOGRAPHY

Angerer, W., & Chappell, M. (2008, May). Design of steel fibre reinforced segmental lining for the gold coast desalination tunnels. In *13th Australian tunnelling conference* (pp. 4-7).

Blom, C. B. M. (2002). Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Delft.

Bofill de la Cierva, J. (2007). Necesidades de Innovacion en la construcción subterránea. Ejecución de túneles con escudo y dovelas prefabricadas. Barcelona.

BTS.(2004). Tunnel lining design guide. The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers. Thomas Telford Ltd. London

Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W., & Drysdale, D. D. (2001). Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, 36(6), 569-596.

Cavalero, S., & Aguado, A. (2013). Characterization of backfill mortars used in different tunnels in Spain. *Materiales de Construcción*, 63(309), 65-78.

Chiriotti, E., Grasso, P., & Xu, S. (2003). Analysis of tunnelling risks: state-of-the-art and examples. *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee*, 69.

de la Fuente, A., Blanco, A., Pujadas, P., & Aguado, A. (2014). Diseño óptimo de dovelas de hormigón reforzado con fibras para el revestimiento de túneles. *Hormigón y Acero*, 65(274), 267-279.

Della Valle, N., Castellví, H. (2016). Diseño de túneles con tuneladora. Ciudad de México: 4° Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en suelos y en roca.

D2 Consult International (2013). Suburban metro Caracas. Segmental lining concept comparison. Linz.

Gruebl, F. (2006). Segmental rings (critical loads and damage prevention). In International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, Bangkok, Thailand (pp. 9-19).

Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (Eds.). (2008). Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control. CRC Press.

Hong, E. S., Lee, I. M., Shin, H. S., Nam, S. W., & Kong, J. S. (2009). Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: application to the design of shield TBM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 269-277.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2013). Mechanised shield tunnelling. John Wiley & Sons.

Peña, F., Morales, J. S., & Meli, R. (2012). Estudios de la interacción entre el revestimiento primario y el secundario de túneles dovelados.

Pescara, M., (2010). Dimensioning the segmental lining. Tunneling and tunnel boring machines. Politecnico di Torino.

Pialarissi Cavalaro, S. H. (2009). Aspectos tecnológicos de túneles construidos con tuneladora y dovelas prefabricadas de hormigón. Universitat Politècnica de Catalunya.

Roger, F., & George, N. (1993). Risk Management and Construction.

Rose, K. H. (2013). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)—Fifth Edition. *Project management journal*, 44(3).

Thomas, A. H., Banyai, J. P., & Macdonald, M. (2007). Risk Management of the construction of tunnels using Tunnel Boring Machines (TBMs).

SKELHORN, S., & MCNALLY, L. (2009). Practical precast ring selection. T & T international, (DEC).

Wannick, H. (2006). A code of practice for risk management of tunnel works. The International.

9. ANNEX

9.1 Interviews

Netx the survey prepared after the extraction of information is enclosed. This survey is the one that has been use for the interviews with experienced participants in the field of the project, for to identify the most significant risks associated to design and construction of TBM tunnel linings with precast segments.

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES

Maria Garcia Salvador



CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE.....APELLIDOS.....

CARGO:..... EMPRESA:

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?
3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?
4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?
7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?
- 2.

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

3. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

4. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

- 5.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas? Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asentamientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

6. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?
7. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?
8. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?
9. Los *gaskets* son afectados por los daños?Cuál es el impacto?
10. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?
11. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

12. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio? ¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?
3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?
4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros
8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?
3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?
4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?
5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?



La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?
12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?
3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pases que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? ¿Cuáles son las razones?

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son los principales fallos en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?
4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?
5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?
6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua
8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?
2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?
3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS



9. 2 Answers

Below are annexed, the surveys answered by the different experts, which have served for the study, data extraction and subsequent in-depth analysis

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: ALBERT DE LA FUENTE ANTEQUERA

CARGO: profesor área de estructuras de hormigón EMPRESA: UPC

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

Los principales riesgos pueden ser:

- a) No considerar alguna etapa de carga (transitoria o permanente) que pueda ser determinante para el diseño del armado
 - b) Empleo de algún coeficiente de seguridad no ajustado adecuadamente
 - c) Modelo de cálculo no ajustado con la realidad
2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

He trabajado siempre con el anillo universal simétrico a nivel de diseño

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

Los principales criterios son:

- a) Tipo de escudo disponible y coste asociado a los cambios del escudo si se opta por un canto de dovela no compatible con el escudo disponible
 - b) Costes de transporte
 - c) Tipo de gatos y magnitud de la carga de empuje. Esto condiciona las posibilidades de fisuración en fase de empuje.
4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

No, más bien desventajas: distintos moldes, rigidez en el transporte y ordenación de las dovelas en los acopios, distintos conjuntos de moldes, entre otras.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

Es demasiado conservador, en particular a nivel de canto y armadura, para situaciones transitorias y permanentes de carga que conducen a flexión. En cambio, a nivel de empuje de los gatos el diseño está del lado de la inseguridad, en general, porque las dovelas suelen fisurar a causa que hay mucha variabilidad en la posición y magnitud del empuje, incluso conociendo los valores que garantiza el fabricante de la TBM.

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

Existen modelos adecuados, algunos muy sofisticados. La problemática estriba en la idoneidad de los coeficientes de seguridad empleados y la magnitud de las cargas consideradas.

7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

El cálculo tiene que combinarse con una buena tecnología del hormigón (curado y tratamientos en fase de acopio). Un cálculo muy sofisticado y preciso puede perder validez si no se identifican acciones determinantes, pero poco frecuentes/raras: enfriamiento brusco del hormigón en climas fríos o variación brusca de humedad entre la fase de curado y el secado en acopio (climas secos y calurosos).

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Dosificación y proceso de curado no compatibles

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Las tolerancias de fabricación de las dovelas, el diseño de la mezcla de hormigón y del proceso de curado acorde tanto con las resistencias exigidas en cada fase de carga transitoria como con las condiciones ambientales.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Por una parte, porque los proyectistas desconocen los métodos de diseño de dovelas de HRF y, por tanto, su campo de aplicación y ventajas. Por otra parte, la inclusión de fibras en el hormigón requiere de un conocimiento de las técnicas de fabricación del HRF y, en particular, del uso de aditivos para adecuar la trabajabilidad de la mezcla.

- 4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas? Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Sobre el encofrado.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

No sé responder a esta pregunta

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Es mejorable y hay trabajos de investigación relacionados con este tema en particular.

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el gasket? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

Mejor después del curado, pues si se coloca antes pueden haber despegues del mismo debido a la retracción del mismo hormigón.

8. Los gaskets son afectados por los daños?Cuál es el impacto?

Pueden verse afectados y el impacto es que se compromete el sistema de estanqueidad

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

No se me ocurre otra disposición distinta a la actual. El uso de fibras metálicas mejora la respuesta de las esquinas en caso de impactos.

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

Sí, es más difícil per tiene ventajas en su colocación.

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio? ¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

Para cada proyecto la dosificación es distinta y siempre debe ajustarse inicialmente; como todo proceso industrial requiere sus tiempos y procesos prueba-error, que se pueden minimizar si el personal es experto. Cuando la producción de hormigón y dovelas va a velocidad de régimen, la dosificación es ya la adecuada. Por tanto, no veo problemas.

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

- Rotura por flexión en fase de volteo y/o izado
- Arranque de los elementos embebidos en el hormigón para llevar a cabo el hizado
- Fisuración/rotura por flexión debido a excentricidades accidentales en los elementos de apoyo de las dovelas en fase de acopio y transporte

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

- Hacer un pre-stock a continuación del curado para garantizar que la temperatura del hormigón se equilibra con la temperatura interna de la planta. Este proceso lleva 2 – 3 días

- Garantizar que la diferencia máxima entre la temperatura del hormigón y la exterior en el parque de acopio no supere los 15°C
3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?
- Utilizar un hormigón con muy baja porosidad para evitar que se pierda humedad del mismo.
 - Sumergir las dovelas o regarlas de forma abundante en fase de secado en la campa de acopio
 - Revestir las dovelas con pintura impermeabilizante
4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Depende de la no conformidad. Si la no conformidad hace referencia a fisuras inaceptable o rotura, se descarta. En caso contrario, la tendencia es reparar y colocar.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Cada obra de túnel es distinta, con problemas particulares que aparecen por primera vez. Desde mi punto de vista, la curva de aprendizaje se prolonga hasta los 3 meses de producción de las dovelas.

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

El acopio y el curado en la campa de apilado.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

Existen riesgos pero no son tan determinantes. En particular, en fase de transporte existen riesgos de roturas por flexión si hay excentricidades en los apoyos y el trazado de la carretera presenta baches (acción dinámica sobre la dovela).

8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

En general se aceptan tras una reparación. En los casos que el túnel se haya diseñado para transportar agua a presión o exista un nivel freático muy agresivo, pueden darse situaciones de rechazo

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

- Rotura del anillo durante el izado dentro del escudo, por flexión.
- Arranque del elemento de izado embebido en el hormigón.
- Rotura por torsión-flexión de alguno de las dovelas cuando el anillo aún no está completo.
- Fisuración en fase de empuje.
- Contactos parciales entre dovelas y fisuración del anillo en fase de empuje debido a que se generan esfuerzos no contemplados en proyecto (viga de gran canto).

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Junta simple elastomérica cuando el riesgo de filtración es reducido y doble junta cuando la presión hidrostática es elevada o los requerimientos de estanqueidad son muy severos.

La existencia de juntas puede conducir a daños en fase de empuje o en situación de servicio si los huecos diseñados para introducirlas no están bien planteado (geometría muy angular) o si las presiones que recibe la junta son elevadas e incompatibles con la resistencia del hormigón.

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

La junta tiene riesgos, pero no es particularmente el elemento o zona más comprometida a nivel de este límite último, en general. A nivel de estado límite de servicio (funcionalidad) sí que es comprometida si los niveles de presión hidrostática son elevados.

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

En general, en fase de empuje de los gatos.

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje? ¿Cuál es la explicación?

Existen MUCHOS patrones de fisuración y causas en fase de montaje: consultar Tesis Doctoral de Sergio Píalarissi Cavalero

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No tengo datos, pero me atrevería a decir que hay poca dependencia entre los problemas citados y la posición de la clave.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Si, se pueden producir fisuras circunferenciales en:

- En fase de montaje del anillo el vuelo de la dovela es inadecuado o se produce alguna acción dinámica extraordinaria
- Si la rigidez entre anillos contiguos es muy distinta y en una se producen deformaciones excesivas. Si el suelo es blando, el anillo deformado se sobrecarga y aparecen flexiones longitudinales que podrían fisurar circunferencialmente el anillo. Es muy poco probable.

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Es útil, pero en algunos casos puede obviarse o, alternativamente, emplear los citados biconos.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

Es difícil y hay muchas incertidumbres asociadas (excentricidad, magnitud real de la carga, posición). La mejor manera es que la placa de apoyo abarque todo el canto de la dovela, con holgura de la misma (más altura de la placa) por si hay excentricidad de los pistones.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

No tengo un criterio claro para esta pregunta.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

A corto plazo es muy improbable debido a los mecanismos de redistribución de carga entre dovelas; sin embargo, a medio-largo plazo sí que se podría dar una rotura si la armadura/refuerzo ha estado sujeta a un proceso de corrosión.

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

Con un control muy intenso de las tolerancias de fabricación de las dovelas y de las cargas transmitidas por la tuneladora.

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Estas preguntas no puedo contestarlas porque no tengo experiencia en esta fase.

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?
2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?
3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?
4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Rotura parcial de algún anillo debido a sobrecargas concentradas; corrosión del refuerzo y rotura gradual del sistema; situaciones accidentales: fuego, explosión, terremoto; y filtraciones

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Según mi experiencia, las principales fallas se producen por degradación/grietas que, generalmente, se ha formado en la fase de colocación.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?

No, las operaciones llevadas a cabo durante la fase de ejecución del túnel son mucho más arriesgadas que cuando el túnel ha sido entregado.

4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Utilizar doble junta y un revestimiento interno de hormigón proyectado.

5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?

No es normal, sólo si se ha producido alguna sobrecarga.

6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Hay productos e inyecciones en base a materiales flexibles que dan buenos resultados en la reparación de fisuras en las que puede existir agua, incluso a presión.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua

Si hay riesgo y no se han tomado medidas adecuadas durante la ejecución y mantenimiento, pues emplear un recubrimiento interno adicional

8. Puede estar relacionada la posición de la clave con las filtraciones de agua?

Puede estarlo, en particular si la clave se coloca en la zona de hastiales.

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?

Desde el punto de vista de funcionalidad la etapa de mayor riesgo es la colocación de las dovelas, pues aunque el riesgo de rotura es reducido, las fisuras que se generan suelen permanecer abiertas y son fuente de problemas (filtraciones, estéticos, corrosión...) y mantenimiento.

2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?

3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

Para estas dos últimas preguntas recomiendo la lectura de la Tesis Doctoral del Profesor Cavalaro; en ese trabajo se abordan estos aspectos.

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: ANTONIO AGUADO

CARGO:..... **EMPRESA:**

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

La puesta de empuje de gatos, se cree que los modelos están perfectamente apoyado pero en realidad no es así.

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

Con el anillo universal es con el que he trabajado. De los otros no tengo una opinión definida ya que no tengo experiencia en ello.

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

No están muy involucrados; transporte, interacción anteriores a la colocación de la puesta en carga. No solo hay que ver las configuraciones iniciales sino las intermedias también, ya que influyen en el manejo. Se ha de buscar un equilibrio entre todos

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

No le veo condicionante, lo bueno es que varíe solo la llave dentro de un rango (permitir una variedad dentro de un rango aceptable)

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura? La armadura muy conservadora, en conjunto son diseños conservadores

Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

No hay problemas de cálculo. Si el proyectista tiene problemas con las dovelas con fibras

6. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

En general sí, pero el modelo de empuje de gatos no está bien definido.

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los riesgos son muy bajos, el momento más delicado en la manipulación de dovelas es cuando se coloca la clave en la parte de abajo con mucha pendiente, con lo que se podrían producir tracciones

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Trabajar con autocompactante, mayor confort para el trabajador, pero aumenta los riesgos porque la pieza no acaba en curva sino acaba más bien recta.

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

La inercia al cambio en el sector es muy grande. La L9 consta de 30 anillos con fibras y no han tenido problemas. Se aconseja para diámetros inferiores de 10m utilizar algún tipo de fibra plástica.

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

- 4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas?
Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Sobre el encofrado se define mejor. En el desarrollo lateral solo hay definidos tres `puntos y alomejor sería conveniente fijar 5 puntos.

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Creo que se podrían suprimir. La técnica ha mejorado mucho. Si la inyección se realiza correctamente es en longitudes pequeñas. Asumir el riesgo de no inyectar no lo tomaría si no se sabe cuántas veces se ha tenido que re-inyectar; si son muchas se siguen manteniendo los orificios. Sería cuestión de tomar una decisión asociada a los resultados que se vayan obteniendo.

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Ha mejorado respecto hace tiempo. Lo que pasa a veces es que sobre el papel es un tema menor, ya que se centran más en el diseño. Hay que tener en cuenta una transición de rigidez en función del terreno, la mezcla no puede ser la misma para cualquier terreno.

La mezcla ha de acompañar el módulo. Se ha de pensar en la compatibilidad no el equilibrio. Tener presente el módulo de transición.

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

Después del endurecimiento y curado

8. Los *gaskets* son afectados por los daños? Cuál es el impacto?

Poco cualquier acción puede tener su efecto

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

Para hormigones con fibras ayuda a llegar a extremos, es un buen diseño del material a incorporar. La armadura por ejemplo no recoge toda la esquina

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

Ningún inconveniente a fabricar

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio?
¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

No es un problema. Mecánicamente son proyectos en buena escala, productos de alta gama, bien estudiados. Se adapta bien a las exigencias obtenidas.

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

En la fase de estacionamiento en la campa; golpes en esquinas

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Zonas de alta condición climática (frío o cálida). Se recomienda hacer naves industriales de mayor recorrido, de manera que se hace una transición entre que la sacas de la maquina hasta llegar a la campa. En definitiva es prolongar el desplazamiento entre los dos puntos.

3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Se recomienda regar dos o tres días antes de que entren las dovelas en el túnel. En la campa no hacer nada. Este riego en definitiva es para hidratarlas y disminuir las tensiones

4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Tirar el anillo entero, conceptualmente no es claro. Se podría plantear si la fábrica de dovelas se encuentra cerca o no y si me sale rentable o no hacer el transporte de un número mínimo de dovelas.

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Es necesario estar al día en todos los sentidos, se necesita estar rodado en todos los aspectos. Un aspecto fundamental son las personas, dependiendo del tiempo que lleven realizando los trabajos y de cómo trabajan en equipo conjuntamente todos.

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Un buen posicionamiento de los ejes de apoyo para evitar sorpresas

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

Hay riesgos pero no importante. Depende de la manipulación no tiene que haber problemas. El problema que puede haber es error humano

8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

Reutilizarla, se arreglan antes del almacenamiento con un mortero de reparación.

Fisuras hay pocas. Si se rechazan es al principio de obra y porque la dirección de obra es quien lo decide.

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Se va a tener de las dos, salvo en diámetros inferiores a 2.5. Solo por los condicionantes de obra las dos aparecen

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

No, el punto de problema es el mal contacto entre ellas, ya que es por donde pueden haber filtraciones. Es un punto de encuentro entre dos ends diferentes

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

En el empuje de los gatos siempre o después en la configuración final

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

Pueden haber diferentes problemas en la geometría, en los apoyos de los gatos. Se asume que son uniformes, pero la forma de transmitir las cargas es muy diferente a la teórica.

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No se no contesto, no importancia clave

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Es muy poco probable, problemas por las excéntricas por laja, situación de travesar una falla, probabilidad muy baja. Se podría tener este tipo de grieta en el caso de que la dovela estuviese colocada en el lugar de paso de una falla.

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Si que pueden ser, no deja de hacer el mismo papel

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

En función de la posición en cada momento del centro de gravedad estará en una posición o en otra. Lo fundamental es mantener la traza. Se puede dar más carga a un lado que a otro por tal de mantenerla. No por evitar las fisuras se va a cambiar la presión de los gatos

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

Inyectar con componentes bicomponentes para que vaya pocos metros y con talud vertical. Reacciona rápidamente al contacto con los elementos, con lo que se recomienda subid el talud vertical. Diseñado al principio de la tuneladora ya que condiciona, bicomponente y más vertical el talud.

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

Si se puede reparar inyectando resinas. Si que puede romper, pero se tiene que dar cuenta antes porque es un problema de armado. Control dimensional en producción

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

Tres puntos de gatos, carga equivalente en más puntos

6. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los usuales en la construcción

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes. (túneles hidráulicos¿?)

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?

Difícilmente se va a poder avanzar si se interrumpe el tráfico principal. Es mejor que los flujos no intercepten entre ellos. El funcionamiento complejo.

3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

Posibilidad de que rote la losa si no está conectada con lo que mejor es conectar y poner topes, poner topes dentro de unas tolerancias

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pasos que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

Existe una posibilidad mínima, en caso singular, pendiente negativa, centro de presiones muy abajo, tal que se sale del núcleo central y haga que la dovela se caiga. Con lo que se utilizan los conectores para evitarlo.

7. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Es poco probable que se tenga una experiencia tan amplia. En servicio la probabilidad es baja. Soluciones para los problemas naturales. Es más difícil que caiga una dovela en servicio. Depende del diámetro, en el caso de diámetros grandes se podría dar, tienen que ser cargas muy importantes o terrenos en el que se produzcan flexiones excesivamente

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?

No, los problemas mayores en construcción, a no ser que las obras de alrededor influyan en las condiciones externas

4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Conduciendo el agua, solución parcial en las zonas de problema. Doble junta sistema de water stop para que la sección transversal tenga dos elementos contra el agua.

5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?

No

6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Estabilizando la causa y rellenar con algo flexible, nada rígido (empeoraría la situación)

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua?

Injectar producto por fuera para taponar la brecha

8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

No, no necesariamente sale por clave sino por donde encuentre camino

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?

Los empujes gatos, puesta en obra y la peor estudiada

2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?

Con medidas preventivas, se asume riesgos con medidas pre y no post, a medida que van pasando cosas se van reduciendo

3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

No sabe no contesta

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: IGNASI CASTELLVÍ

CARGO:..... **EMPRESA:**

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

Los principales riesgos son los estructurales y los geométricos. Además de la facilidad en el montaje (que las dovelas sean rápidas de montar).

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

El anillo simétrico permite adaptarse a los diferentes tipos de trazado como por ejemplo al trazado ferroviario. También se puede adaptar a trazados complicados.

Cualquier otro diseño implica un estudio más detallado, más cantidad de moldes si hay un gran número de curvas ...

Por lo general para túneles más específicos pueden resultar más económicos en algún aspecto pero necesitan de su logística propia

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo?
¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

Los criterios para minimizar serían la cantidad de dovelas por cuestión de tiempo de montaje. Reducir las juntas y asegurar que el empuje de los gatos corresponde al correcto, permitiendo una compresión en la dovela más uniforme.

Permitir un empuje debido a las juntas.

También permitir el giro del anillo con suficientes posiciones de giro.

Las dovelas las diseña el propio proyectista. En todo caso en ciertos aspectos si se tiene en cuenta el criterio del fabricante, sobretodo en aspectos nuevos, pero principalmente prevale la decisión del proyectista.

En algún caso si se acostumbra a consultar al de la TBM para verificar que no hay problemas con la configuración de los gatos, al igual que también influye en el número de dovelas.

Proveedores aparecen con nuevos casos de juntas y aditivos, en hormigón o en las juntas, lo que al final se acaba teniendo en cuenta si puede ser ventajoso para el proyecto.

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

No, ninguna

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio de la longitud de desarrollo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador?
Demasiado espesor? Demasiada armadura?

Por norma general gusta que el anillo sea simétrico, es mejor para compensar el ángulo. Por ejemplo en el caso 18+1 posiciones sería muy complejo por lo que no se haría.

El diseño es bastante seguro.

Se podría decir que sí que hay demasiada armadura.

El espesor no acaba influyendo ya que le da más estabilidad al anillo. Sí que es cierto que el peso de la dovela aumenta, pero a su vez eso hace que la dovela sea mucho menos móvil. Sigue siendo un elemento articulado pero más estable. Sufre menos movimientos extraños.

La esbeltez del anillo aumenta las imperfecciones.

Por tanto, sería mejor reducir la a cantidad de armadura, ya que esta la puedes controlar mejor que otros aspectos.

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

Sí, se llega a modelizar tramos de túneles

7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

En las situaciones transitorias es muy difícil poder cubrir todas las situaciones que se experimentarán.

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Error en la calidad, tanto en el material como en el seguimiento.

Falta de experiencia en la ejecución o errores en los moldes o daños sobre ellos.

Se pueden escanear los moldes o hacer un anillo maestro para asegurar la calidad, pero alguna vez puede fallar algún aspecto.

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

La puesta de hormigón y el curado

También es importante el tema de las inspecciones, de supervisiones y un buen jefe de obra.

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Debido a que las fibras no se distribuyen perfectamente, salvo que se sea un experto.

Provoca dudas tanto en el diseñador como en el cliente.

Es muy difícil asegurar que la distribución de fibras es la correcta. Aunque los estudios estén bien, no es un procedimiento tan seguro.

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas? Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Previamente al arranque de los trabajos se aconseja medir sobre el molde o por escáner. En el día a día se ejecuta el control de dovelas ya que es más práctico.

Con el sistema se asegura un muestreo de la calidad de la dovela.

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asentamientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Pueden ser suprimidos los orificios pero no es necesario. Es necesario mantenerlos en geologías complicadas y en túneles en roca. En terrenos homogéneos blandos con las nuevas tecnologías se podría evitar, con la inyección de bicomponente.

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Es correcta. Hay ámbitos de mejoras, con diseños no modernos. Aditivos, bentonitas, uso recomendado en hormigón con bicomponente.

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

Es mejor colocar el *gasket* en el casting. Mejor colocarlos lo más tarde posible para evitar en el acopio la intemperie, evitar daños con lo que es necesario protegerlos.

8. Los *gaskets* son afectados por los daños? Cuál es el impacto?

Por el efecto del envejecimiento, intemperie a temperaturas extremas (alto grado de sol / frío), golpes o daños en su manipulación, pérdida de estanqueidad...

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

Añadir algo de fibras, protecciones mecánicas en el transporte y manipulación, no necesarias zona acopio

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

La forma de fabricar es muy parecida (que la otra)

si, de fabricar es muy parecida

Si le veo una ventaja, conforma el mejor anillo universal diseñado por el momento

En función de túnel, así como la capacidad de giro en el momento de giro del túnel en el momento de construcción.

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio?
¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

Es satisfactorio, según las especificaciones de cada normativa

Los problemas más importantes es en la puesta en obra, y se puede mejorar con los aditivos

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

No he tenido experiencia negativa, se dejan dentro, se cumple la normativa el tiempo necesario, teniendo temperatura ambiente en fabrica

3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

No, es cuestión de humificar el ambiente de la fabrica y humificar doveles

4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿ Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Se descarta todo lo que sea no conforme, hasta que se subsane y si no se desecha

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Depende si TBM nueva 1 mes o dos con constructores experimentados, siendo lo mas lento. para TBM se usan en segundos tramos misma obra o de segunda mano los tiempos 1 semana 2 semanas

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Correctos equipos evitar accidentes, formación adecuada

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.



7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

Incorrecta manipulación, falta de instrucciones, cambios en el personal, golpes

8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

Existen procedimientos de dovelas, ante cada desperfecto salvo errores grandes

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

No montar el anillo perfectamente circular, no prestar atención a que alguna junta quede mal colocada, golpes o introducción forzada de la dovela o que la dovela quede demasiado abierta

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Se debe evitar la existencia de juntas en cruz, es decir, que coincidan juntas transversales y longitudinales de diferentes anillos en un mismo punto. Por eso se montan de maneras diferentes. Si no siguen esta buena praxis, se generan puntos débiles en cuanto a estanquidad

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

Sí, es el punto débil articulado del anillo

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

Al iniciar la excavación y al salir el anillo del escudo, si existe roce con el mismo o si hay alguna carga desmesurada del terreno

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

En fase de montaje no debería haber fisuras ya que la presión ejercida por los gatos es inferior a la presión de excavación. Si fuese debido al empuje sería por un mal montaje o un mal diseño de éstas.

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No siempre cierra en la misma posición la clave.

Sí que hay comportamientos diferentes pero no tienen una base teórica. Hay posiciones que son algo más peligrosas.

Por ejemplo las claves a las 12 pueden tener una ligera obertura entre las contra claves, lo que puede repercutir en que la clave baje unos cm.

Hay peligro en túneles en que tienen altas presiones en la parte inferior y que la clave se encuentre en la parte baja. Esto puede ocasionar que en el momento de la inyección, la dovela pueda salir, ya que tiene mucha presión

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Bajo cargas desmesuradas no previstas o que el anillo no soporte por defectos propios en la fabricación

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el último anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

Sí, los biconos de centrado acostumbran a ser algunos frágiles y algunos modelos son menos hábiles a la hora de montaje.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

No se puede, en la fase de ejecución y en la fase de diseño se intenta distribuir lo más uniforme posible.

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo (en roca) sino en junto detrás. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

En EPB se inyecta justo detrás del escudo, el relleno se hace completo siempre que se inyecte por todas las partes a presión.

En roca inyectas entre un tercio y la mitad por la parte baja gusto por debajo de la cola, lo otro se inyecta a través de las dovelas aproximadamente n-7 anillos con lo que se genera un cono de llenado teórico correcto. Para asegurarse que se ha inyectado en todos los lugares se hacen catas perforando la dovela (por la parte que tienen un orificio) de manera que no taladras toda la dovela. Si al hacer la cata hay mortero bien, si no hay que inyectar otra vez.

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

Puede pasar que fisuren enteras por errores en la colocación en los anillos anteriores. Puede deberse a imperfecciones propias del anillo.

Con lo que se debe reparar o encofrar y reparar en ese mismo momento.

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

Asegurar que los planos transversales coincidan perfectamente y que los intradoses de las dovelas quedan perfectamente alineados, anillo perfectamente lineal y que el hueco de la clave tenga la medida exacta.

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Se ejecuten perfectamente según proyecto, riesgo perforar la dovela y la parte del trasdós y conectar con el nivel freático.

No bien inyectado el trasdós, al introducir cargas ligero movimiento , asentamientos

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?

Sí es posible, pero es muy caro. A partir de 12-15m losa intermedia completa en el caso de túnel de 15m.

Otro ejemplo sería también la m30

3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

No se sabe

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pasos que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

No es común, puede pasar porque se ha perdido presión en los gatos de empuje

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

No he observado fallas graves, pero si ha visto filtraciones graves y degradación debido al agua

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?

Para el cliente si

4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Si el túnel se ha ejecutado correctamente:

- Los gaskets trabajen bien comprimidos según su especificación
- Relleno del mortero del gap en el extradós perfectamente ejecutado

Si no se ha ejecutado correctamente:

- Se deben realizar inyecciones

5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?

No

6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Desconozco casos

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua?

Ejecutando inyecciones extras

8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

Sí, si ésta se ha movido. Pero se trata de una mala ejecución/colocación del anillo.
Sí que hay posiciones más desfavorables pero se trata de una mala ejecución

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?

- Fabricación hay que asegurar que la fabricación se hace según lo especificado
- La colocación, anillo perfectamente circular y con las juntas comprimidas, así como centrado en el escudo y concéntrico en el anterior.

2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?

Para mí prevenir es mejor que curar, rechazo del túnel en fase ejecutiva

3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

- Resistencia del hormigón
- Calidad del acero
- Geometría
- Fabricación: tiempos de curado y temperaturas
- Colocación: análisis geométrico del anillo una vez posicionado: existencia de resaltes
- Observación que la junta se ha colocado correctamente

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: FLORENCIO MILLA

CARGO:..... **EMPRESA:**

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

Hemos tenido la oportunidad de trabajar con anillo universal en todos los proyectos de EPB, y anillo izquierda- derecha en proyectos con TBM para roca doble escudo.

Indudablemente el anillo izquierda derecha es muy fácil de colocar, aunque una vez adquirida experiencia el universal no tiene ningún problema de colocación. Quedando mucho mejor solapado este último.

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

En mi caso siempre ha diseñado el anillo una empresa externa. Pero si le puedo afirmar que al proveedor de la TBM (si esta es nueva) se le entrega el anillo elegido y este diseña la tuneladora de acuerdo a este, eligiendo Diámetro de excavación, número de cilindros, posición de los mismos, carrera, diseño erector de dovelas, diseño de polipasto, mesa y altura necesaria.

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

Desde mi punto de vista, no es conservador, hemos sufrido en algún proyecto roturas importantes de anillos por empujes del terreno y por presiones transmitidos por los cilindros de avance.

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?
7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas? Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Pienso que es necesario mantener los orificios de inyección para realizar posibles intervenciones de impermeabilización y campañas de reinyección sobre todo en terrenos de roca.

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Parece que tiende a imponerse el mortero bicomponente frente al mortero convencional.

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

Nosotros lo colocamos una vez ha salido del túnel de curado mediante un marco para pegado de juntas, justo antes de pasar al acopio.

8. Los *gaskets* son afectados por los daños?Cuál es el impacto?

Generalmente no, pero algún daño puede producirse en la colocación mediante el erector, sobre todo en el caso de la clave.

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

Acercar la armadura al máximo de la esquina y utilizar fibras.

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

No creo que está bastante conseguida la fabricación.

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio?
¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

La dosificación se adapta en proyectos donde el terreno es cambiante, túneles en roca, realizando una tramificación de los anillos y ejecutando varios tipos de dovela con diferente armadura y dosificación logrando una resistencia mejorada para ciertos tramos de terreno. El problema viene cuando el perfil geológico teórico no se adecua al real.

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?
4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Existen las dos posibilidades, a veces nos descartan el anillo completo y a veces alguna dovela suelta que hemos tenido que fabricar de nuevo en el mismo molde que la pieza original.

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.

También es muy importante la colocación de los tacos de apoyo en suelo y entre dovelas para que reparta la carga tal y como se ha previsto.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

Siempre hay riesgos de pequeños golpes en aristas y esquinas, pero se minimizan bastante con la utilización de pórticos y pinzas de dovelas. También con eslingas con protecciones de poliuretano.

8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

Algunas se pueden reparar con un producto especial aprobado, si los defectos son muy grandes se descarta la dovela.

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Nosotros siempre hemos trabajado con junta pegada, pero parece que ya se utilizan en otros proyectos la junta embebida.

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

Es arriesgada en la introducción de la clave ya que la junta es de caucho y se produce un rozamiento entre la clave y las contraclaves.

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

En la último momento de colocar la clave, como el hueco no esté lo suficientemente holgado se produce el arrollamiento de la junta, y puede desprenderse alguna esquina.

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

La mejor práctica es recurrir a un operador experimentado, y colocar el anillo con el tiempo necesario, sin prisa, esta suele ser una de las causas de desperfectos por colocación.

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?

Es posible, sabemos que en algún proyecto de túneles de gran diámetro se ha ejecutado la losa a la vez que la excavación con la TBM.

3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pasos que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?
4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?
5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?
6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua
8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?
2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?
3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: GONZALO RAMOS

CARGO:..... EMPRESA:

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

En el diseño los riesgos principales están asociados a ignorar o despreciar casos de carga temporales (verbigracia alguna manipulación), o a una mala evaluación de la etapa de servicio (mal conocimiento del terreno y del nivel freático, no tener en cuenta posibles alteraciones futuras por nuevas construcciones que afecten al túnel).

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

Siempre universal simétrico

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

El tamaño de las dovelas resultantes, pues la manipulación es crítica en la fase de montaje (deben poderse mover dentro de la tuneladora). Depende, en contratos tipo D&B sí, en proyectos constructivos tipo España al ser el diseño previo a la adjudicación es imposible una coordinación.

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

Ninguna, excepto en la dovela de clave que hay que encajarla y un tamaño excesivo dificulta la operación.

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

Los espesores se están ajustando. En general sí sobra armadura porque se consideran en el diseño criterios como los de armadura mínima de las normas que no están pensados para dovelas.

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

Sí, no es un problema de modelos. Pero no todo el mundo utiliza modelos sofisticados, sino que en algunos casos se utilizan modelos muy simplificados. O sea que existir los modelos existen pero no todo el mundo los usa por su complejidad y coste.

7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

Podría cubrirlas, el problema es estar seguro de cuáles son todas esas situaciones a priori. Como eso no es siempre posible, a veces existen situaciones no estudiadas

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los riesgos geométricos en cuanto a precisión de fabricación. Como las dovelas no son conjugadas como en un puente es preciso una gran precisión y rigidez de los moldes para asegurar las tolerancias.

Los riesgos de calidad del hormigonado. Estos se pueden controlar con una buena definición inicial de la dosificación, vertido y vibración, y un control de ejecución. Siempre hay problemas en las primeras dovelas.

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Ya se han construido bastantes túneles con fibras y aportan claras ventajas de fabricación al eliminar el montaje de las jaulas, mejorar el comportamiento frente a impactos, pero empeoran la resistencia frente a cargas localizadas como son los gatos. Se puede trabajar en esa línea, aunque ya está consolidada. También en la utilización de hormigones autocompactantes (también ya existen ejemplos).

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Problemas normativos (pocas normas admiten estructuras sólo con fibras) y problemas con las cargas localizadas. Además de desconocimiento técnico y control más caro del hormigón.

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la

construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

4. Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas? Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Sobre la pieza acabada.

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asentos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Actualmente aún no, sigue siendo preciso realizar reinyecciones en algunos puntos, generalmente por sobre excavaciones.

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Los bicomponentes funcionan muy bien. Se deberían generalizar. El problema creo que está en el proceso, en el caso de tener una sobreexcavación. Los volúmenes de mortero que se fabrican para cada anillo, aun siendo mayores que los teóricos, no contemplan la posibilidad de tener una sobreexcavación a rellenar. Habría que pensar algún modo de fabricación en continuo.

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

En el casting es más rápido y queda mejor sujeto.

8. Los *gaskets* son afectados por los daños? Cuál es el impacto?

Difícil de evaluar.

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

Las ventajas son de no coincidencia de juntas. Fabricarlas da igual trapezoidales que rectangulares, especialmente si no llevan jaula de armadura.

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio?
¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

El mayor problema es que llegue bien a las esquinas. Los autocompactantes son el futuro.

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

No haber previsto en el diseño la manipulación que realmente se está haciendo o al revés, incumplir lo previsto.

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Sin experiencia. Enfriamiento controlado.

3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Sí tengo experiencia. Riego y aislamiento con plásticos. Hay que asegurar que los plásticos estén bien cerrados para que mantengan humedad.

4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

No entiendo porqué mucha gente descarta el anillo cuando hay un problema con una dovela. No tiene sentido excepto por logística, pues montar anillos con dovelas dispersas es complicado.

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

No tengo datos

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Todas. Cualquier incumplimiento de lo previsto en diseño puede dar lugar a daños inadmisibles.

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

Sí. Son acciones dinámicas. Hay que ir con cuidado, no con prisas.

8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

Siempre se intentan reutilizar realizando una reparación.

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

No conformar correctamente el anillo. No debería ser posible dada la presencia de pernos, barras de guiado y biconos pero pasa.

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Pregunta no clara.

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

Todas las juntas dan problemas porque tienen esfuerzos localizados y pueden haber sufrido impactos al ser los bordes de las dovelas.

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

Ambas al entrar en carga. La circunferencial al aplicar los gatos, la radial al inyectar.

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

Las fisuras de introducción de las cargas de los gatos.

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No sabría decir

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una

presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Nunca he visto grietas, ni fisuras, circunferenciales debidas a un comportamiento global. Sí locales como consecuencia de introducciones de cargas localizadas, esquinas mal apoyadas, etc.

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Sí, las barras de guiado son útiles. No se puede tener biconos en las dos juntas porque no sería posible el montaje.

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco(rueda, no disco) de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

Asegurando cumplir los máximos de excentricidades y las fuerzas establecidas.

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

No debería en ningún caso inyectarse varios metros detrás del escudo! Todas las máquinas modernas inyectan por cola.

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

Es muy complicado que una dovela se rompa físicamente, a no ser que el tradós esté hueco por un error de inyección. Si sólo son fisuras se inyectan. En algún caso se han sustituido dovelas por un hormigonado in situ.

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Que no se hayan previsto y que las dovelas no estén preparadas para resistirlos.

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?

Sí, pero es complicado. Hay que coordinar muy bien los espacios afectados.

3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

Primero, en castellano es o una contrabóveda (si es resistente) o un relleno, pero nunca una losa invertida. No veo la necesidad de ningún tratamiento adhesivo.

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pases que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

Lo de los pases, no se entiende, supongo que se refiere a pernos, pero no lo sé. Nunca he visto hacer libremente una dovela.

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Modificaciones al túnel o a su entorno (rellenos o excavaciones sobre o cerca del túnel)

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Los principales problemas son los debidos a ovalización por cambios en las acciones del terreno (rellenos o excavaciones cercanas, variaciones en nivel freático). La falta de impermeabilidad genera problemas menores.

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?

Sí, a largo plazo

4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Entiendo que en vez de fugas se refiere a infiltraciones de agua. Lo óptimo es asegurar una colocación perfecta, con todos los gaskets comprimidos. Si existen filtraciones sólo se puede inyectar el trasdós.

5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?

Cuidado con qué llamamos grietas. NUNCA una grieta es normal, una fisura sí.

6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Injectarlas con resinas epoxy. Para garantizarlo hay que primero averiguar la causa. Si es por ovalización por cambio de condiciones externas, pues ya sabemos dónde actuar, si es posible.

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua

Visualmente

8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

No

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?

Manipulación y montaje porque hay muchas personas implicadas y puede haber fases no contempladas.

2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?

Control por alguien que coordine todo el proceso desde el diseño hasta el túnel acabado.

3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

Identificarlo

Estudiarlo

Diseñar medidas para reducirlo

Controlarlo

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: NÉSTOR RUALTA

CARGO:..... EMPRESA:

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

No cumplir las expectativas; no resista los esfuerzos; poco manejable para los operarios; cargas no calculadas bien; anillo no resistan; accesorios no funcionen correctamente.

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

Sí anillo universal (dovelas todas de la misma longitud)

Anillo a derechas/izquierdas es utilizado en Inglaterra y Singapur por un tema de seguridad, ya que de esta manera la clave siempre queda en la parte superior del anillo (por encima del medio del anillo)

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

Depende del tipo de proyecto: si el proyecto ya está hecho (todo está diseñado ya) o si se realiza el diseño y la dirección de obra.

Menos dovelas y más anchas, con lo que hay menos ciclos de excavación.

Lo ideal sería un trabajo mutuo entre el diseñador y el contratista.

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

No tiene ni ventajas ni inconvenientes ya que o todas las dovelas tienen la misma longitud o todas iguales menos la clave que puede estar a $1/3$ o $1/2$. Se dimensiona para la más

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

Depende del diseñador, si tiene más experiencia el diseño será más optimizado, menos experiencia menos optimizado

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

Si

7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

Está bastante estandarizado, tabulado

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Depende de si es carrusel, estático. (cada uno tiene sus riesgos)

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Depende de cada proyecto

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Depende del país y de la filosofía de trabajo. Por ejemplo en Inglaterra y Alemania utilizan fibras.

También depende del cliente

Al fin y al cabo depende de la filosofía de trabajo del país, del cliente, del diseñador...

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

- 4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas?
Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Siempre se realiza sobre el encofrado, cada x tiempo se va viendo el molde.

Los desperfectos que puedan tener son muy pequeños

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Mejor dejarlos para el relleno del trasdós para impermeabilización y para que el anillo no tengas fisuras.

El grout para roca se inyecta a través de las dovelas.

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Hay que controlar bien la inyección a presión y volumen. Depende de cada tipo de máquina.

Se utiliza tanto el monocomponente como el bicomponente. Con el monocomponente tienes todo más controlado, en el bicomponente te influyen diferentes aspectos (aditivos)

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

Por la colocación del anillo poner asegurar que no rompa ni se pone bien.

8. Los *gaskets* son afectados por los daños? Cuál es el impacto?

Importante la parte de fuera que queda del *gasket*, ya que si no está bien puesto al sacar el anillo puedes romper la parte exterior y descalzar el *gasket*

También depende del mecanismo de transporte, a la hora de cogerlas

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

Hay diseños en que las esquinas les ponen un plástico para proteger.

La mejor protección es que tengan fibras te dan un poco de margen en los golpes

Lo mejor sería una buena protección y una buena manipulación

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

No es más difícil de fabricar. Las ventajas son que a medida que empujas creas presión entre ellas, evitas la colocación de tornillos. La colocación es más fácil.

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio? ¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

Depende mucho de los materiales de fabrica, a base de pruebas en la fase de aprendizaje acabas dando con lo óptimo.

Depende de cada sitio, a veces es más un problema con los áridos.

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

9. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

Mala manipulación puede dar problemas

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración. (depende del proyecto y de la prisa del proyecto)

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

10. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Por ejemplo en Sofía (Bulgaria) ponen el vapor de manera individual una a una. La temperatura es diferente entre la fabrica y la temperatura exterior. Se aconseja dejar las dovelas un día en la fábrica y después sacarlas a la campa, de manera que evitas el choque térmico

11. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Protegiéndolas con una funda para que no de sol

12. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿ Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Normalmente la metodología es repararlo para todo, las coqueras y las fisuras se reparan Las que están en más mal estado se aprovechan para otras funciones

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

13. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Depende de la prisa que se tenga y del presupuesto del proyecto; de los operarios si son experimentados o no...

Normalmente en planta la dovela está más tiempo por el tema de la dosificación hasta que sea correcta que no en el proceso de los operarios

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

14. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Definir correctamente el hormigón y que seas capaz de adaptarte a los cambios, p ejemplo con los áridos, todos los cambios definir y estar atento

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.

15. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

Una vez pasado un día, el transporte no debería ser problema.

16. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

Se reparan y se utilizan

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

Mala colocación, mala manipulación

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Hay de todo gasket → packet si tienes mucha presión entre dovelas también pueden dar grietas preferenciales. las que van encoladas poner junta

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

Es un punto crítico si tienes previsto agua en el túnel. Es una cadena que falle la junta, por el relleno del trasdós

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

En el montaje o manipulación, se descoloque, se rompa por detrás el hormigón

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

Depende hay gente que rompe más las esquinas. Los patrones de fisuras vienen dados por mal relleno del trasdós

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

En mi caso no lo he visto nunca, antes de que se agriete le pasará algo a la junta . Son más de reajustes entre los anillos

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

La utilización de la barra de guiado también depende de la filosofía de trabajo. Ayudan al montaje y aportan algo en el cortante entre las dovelas.

Bi-conos: son complementarios, no substituyen una a otras. Puede darse el caso de las dos opciones

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

Empujas lo que tienes, el diseño de la dovela tiene que estar diseñada para el esfuerzo máximo de la máquina. Si está todo correctamente montado la presión no afecta al anillo

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío. si es en roca

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

A base de reinyecciones y controlarla. Si se inyecta muy atrás puede haber problemas, con o que es mejor inyectar más adelante

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

Una vez colocada no, mientras la colocas puede fisurar, pero al ser radial la fisura tiende a cerrar

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

Gente con experiencia

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Depende del túnel, si tiene estructura o no, de las conexiones...

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?

Sí, pero tiene que estar pensado, es cuestión de planificación

3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

No hace falta, no se ponen nada en especial

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pasos que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

Una vez montado no, durante el montaje puede, por la simple deformación de todo no puede colapsar

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

El tema de la durabilidad del túnel, es más tema de reparaciones que fallo estructural

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Terremotos no afectan; incendio puede perjudicar la dovela disminuir el canto, incluso sacarla o quitarla, es lo peor que pueda pasar.

Las otras actuaciones son puntuales

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?

Lo que tiene que pasar ya ha pasado. Es importante el control y calidad de las reparaciones.

4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Con reinyección del trasdós continuamente

5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?

Si todo está correctamente es difícil que pase

6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Depende si tienes entrada de agua entre juntas, se inyecta detrás.

El problema siempre estará en el trasdós

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua?

Controlar la entrada y salida de agua y con bombas

8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

No

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?

Manipulación y montaje



2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?

Formar bien al personal que trabajará en el proyecto y que sea consciente de todo en todo momento.

3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

Formación del personal

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBRE: TOMÁS ARRANZ

CARGO:..... **EMPRESA:**

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

Mala praxis por no tener tiempo para diseñar, poner armadura lejos

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

Universal todas curvas y trazados

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

Al final la práctica y experiencia, más diámetro menor número piezas

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

Más pequeña clave más rápido se monta.

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

No conservador, más rígida mejor,

1. Mínimo número de dovelas
 2. Mayor espesor
 3. Juntas no longitudinal, ligeramente no longitudinales para un túnel más rígido
6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

No/si es difícil considerar todas las variables, difícil de contemplar en el cálculo

7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

No en general el diseño cubre todo, pero hay circunstancias que no se pueden prever.

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Hay pocos fracasos, espacio controlado, elementos estandarizados, es poco habitual que se produzcan riesgos, elemento absolutamente controlado

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Las fibras son buenas para fisuras más distribuidas y más pequeñas, para el trasiego. Pero los esfuerzos puntuales sobre la dovela los recoge la armadura

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas?
Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Sobre el encofrado.

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

Anillo se inyecta bien por cola

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Hay que dejarlos por si no se ha inyectado bien por cola, es una medida por si a caso

6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?

Si, especialmente con los morteros bicomponente

7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?

En el último momento en la colocación de la dovela en el túnel

8. Los *gaskets* son afectados por los daños? Cuál es el impacto?

No si lo pones al final

9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

Con la armadura cercana a la esquina, poner armadura de piel y poner armadura de fibras. armadura pasiva más cerca de la de piel.

10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?

Le da más ventajas, tenerlo en cuenta en el diseño. Aporta más ventajas, anillo más rígido

11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio?
¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

Está todo correcto

2. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

No experiencia

3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

Antes de meter en el túnel regarlas antes de colocarlas en el túnel.

4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Si se tiene un buen control, se repara y se aprovechan.

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Depende del personal con experiencia así será la curva 3 semanas, 5 meses malo

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Las piezas se cojan según el proyecto, manipulen y acopien correctamente, sino añades esfuerzos para las que no están diseñadas

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros defectos que afecten a las propiedades de la dovela.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros

No hay riesgo si la resistencia con la que sale de fabrica sea la adecuada.

8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

Depende del daño, son reparables o no reparables.

4. ACERCA DEL MANEJO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

2. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Longitudinales hacerlas ligeramente no longitudinales para dar más rigidez al anillo.

3. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?

No

4. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

Cuando está saliendo del escudo.

5. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

No hay patrón, son mucho más complejos

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos

con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

6. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

7. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

No

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

8. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

Es imprescindible para hacer un túnel de calidad, no es posible montar al cm. entro, la rompo o cuesta mucho de poner y no la pones

Si , los biconos mejor por la colocación, es mas rápido y más calidad,

9. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

Es imposible, hay que empujar para guiar la tuneladora. no es una variable

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

10. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

En roca es más difícil de garantizar

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

11. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

No es posible

12. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?

No, porque TBM trabaja a altos rendimientos lo que hace bajar el rendimiento otras actividades

3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

Depende del lugar se reviste

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pases que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

No, todo el túnel esta precomprimido

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Peor que queden cejas (mala colocación, entra agua)

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?

Organización producciones

4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Injectar por cola bien y colocarlas bien

5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?

No

6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Las fisuras aparecen por una causa, si desaparece esta no vuelven a aparecer

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua?

Túnel 100% seco imposible, depende normativa establecen unos cabales mínimos

8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

No

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

4. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?

Cuando sale del escudo

5. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?

Haciendo dovelas lo más rígidas, mínimo numero de juntas y más espesor dovela

6. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

El riesgo mayor en la operativa, depende de la persona que monta.

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS

El presente documento es parte de la investigación llevada a cabo para la redacción de la tesina titulada **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE REVESTIMIENTOS DE TÚNELES CON TBM MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN ARMADO** (Autor: María García Salvador, Tutor: Javier Pablo Ainchil Lavín) desarrollada en la ETSECCPB-UPC para la titulación de Ingeniería de Obras Públicas.

Esta tesina trata de recopilar información sobre los riesgos que se puedan dar en la fabricación; acopio y manipulación; montaje por TMB ; explotación y uso, para posteriormente analizarlos y finalmente proponer una serie de planes de mitigación.

Para ello, se ha empezado analizando información respecto a las dovelas y a la construcción de túneles por TMB, tanto de proyectos, estudios, libros e información aportada por mi tutor del trabajo. De éste análisis realizado, surgen diversas dudas u observaciones que se detallan a continuación.

Por ese motivo, se agradecería su colaboración en la resolución de las siguientes cuestiones y, si así lo desea, se le enviará el documento final fruto de ésta tesina, en la que se respetará el anonimato de todos los participantes.

Campos a rellenar (NO OBLIGATORIO):

NOMBR : EDUARDO SALVADOR MARTÍNEZ

CARGO: Riyadh Metro TBM Design Manager EMPRESA: TYP SA

Sólo se contesta a las cuestiones del apartado 1-Diseño

1. ACERCA DEL DISEÑO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en el diseño de dovelas para túneles ejecutados con TBM?

Los principales riesgos para el diseñador (no para la construcción o para el túnel) son el cambio en los parámetros de entrada a los cálculos, cuando estos ya se han realizado. Esto lleva a tener que repetir trabajo. Por otro lado, si se espera a que todo esté completamente claro puede quedar un plazo muy corto para completar el diseño.

Las dovelas se diseñan geométricamente para que formen anillos universales. Este diseño permite adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. El criterio a definir la llave como un tercio o un medio de la dovela tipo, y que ésta tenga la misma longitud media.

2. ¿Ha trabajado usted siempre con el anillo universal simétrico? ¿Qué opina de los otros anillos ya sean a derechas/izquierdas/especiales?

Siempre trabajamos con anillos universales. Los otros tipos de anillos dificultan y encarecen la construcción.

3. ¿Qué otros criterios se suelen seguir para definir el número de segmentos de un anillo? ¿Están los diseñadores de la dovela y la TMB y proveedores involucrados en esa decisión?

El número y forma de las dovelas, la longitud de cada anillo, etc., se decide o se escoge normalmente por el Constructor. El diseñador parte de esos datos. Es el diseñador de la TBM y el Constructor el que pasa los datos al diseñador para trabajar.

4. ¿Ve usted alguna ventaja de tener diferentes dimensiones en todos los segmentos de un anillo?

Cada dovela del anillo es diferente de las demás. Aparte de la dovela clave, que suele ser más pequeña, el resto son parecidas pero nunca exactamente iguales. Todas tienen dimensiones ligeramente diferentes. No creo que sea posible unificarlas a nivel de diseño detallado, aunque sí a nivel de prediseño o anteproyecto. Al final, siempre se requiere un diseño detallado de cada dovela.

El anillo de dovelas más frecuente es el de tipo universal, resultado del corte de un cilindro teórico por dos planos, dos ligeramente inclinados. Se dividen en tramos, que serán las citadas dovelas. En cualquier caso siempre hay un número $n-1$ de dovelas con el mismo ángulo central y una clave con la mitad o el tercio del ángulo.

5. En la actualidad el diseño de segmento es bastante seguro, o incluso conservador? Demasiado espesor? Demasiada armadura?

El diseño se adecúa a las hipótesis de carga que se contemplan en el Pliego o que exige la Propiedad o el Cliente. Todos los Clientes finales (administración o propiedad) tienden a ser conservadores, mientras que el Constructor tiende a lo contrario. No puede hablarse en general, el diseño será más o menos conservador dependiendo de las circunstancias, aunque siempre se pretende que sea lo bastante seguro.

6. Hay suficientes cálculos o modelos seguros para el cálculo de dovelas?

Existen muchos tipos de cálculos y/o modelos. Desde modelos 2D simples (barras), hasta sofisticados modelos 3D de elementos finitos. Se emplea uno u otro dependiendo de las exigencias del Cliente y del presupuesto disponible para el diseño, como es lógico.

En los modelos sencillos se suele ser más conservador, y en los modelos complejos se puede ajustar más el diseño.

7. ¿Cree que el cálculo cubre todas las posibles situaciones que va a experimentar la dovela?

Eso se pretende. El número de casos de carga e hipótesis de diseño es muy amplio para cubrir todo lo razonablemente posible.

2. ACERCA DE LA FABRICACIÓN

1. ¿Cuáles son los principales riesgos implicados en la fabricación de un revestimiento con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

La fabricación de dovelas es una fase que representa una parte importante del proyecto de un túnel.

2. Qué área de mejora considera más relevante con respecto a la fabricación?

Según varios estudios realizados sobre la construcción de dovelas, se ha valorado la opción de fabricar las dovelas con fibras de acero ya que prestan mejores condiciones en cuanto a resistencia al impacto, al desprendimiento, durabilidad de la estructura, disminución de reparaciones, etc...respecto de las dovelas con hormigón armado.

3. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Las dovelas se fabrican utilizando moldes metálicos con tolerancias muy exigentes con el fin de conseguir un buen ensamblaje de los anillos y las dovelas. Se ha comprobado a lo largo de la construcción de dovelas, que las dimensiones de las dovelas pueden variar entre un grupo y otro, variando las dimensiones de estas.

- 4.Cuál es la mejor estrategia para el control de las dimensiones reales de las dovelas? Sobre el encofrado o sobre la pieza?

Para dar continuidad entre el terreno y el anillo, reducir asientos, prevenir el movimiento de las dovelas en el anillo... se aplica el mortero de relleno a partir de la cola del escudo. Pero también es posible inyectar a posteriori mediante los orificios que tienen la dovela.

5. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?
6. ¿Cree que la dosificación de la inyección está suficientemente lograda? ¿Qué debería mejorarse?
7. ¿Cómo se puede colocar mejor el *gasket*? ¿En el casting? O después del endurecimiento y curado?
8. Los *gaskets* son afectados por los daños? Cuál es el impacto?
9. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?
10. ¿Le parece que la forma trapezoidal es más difícil de fabricar? ¿Le ve alguna ventaja?
11. ¿Cree que el diseño y la dosificación del hormigón para dovelas es satisfactorio? ¿Cuáles son los problemas más importantes? ¿Cómo los solucionaría?

3. ACERCA DE LA MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos en la manipulación y almacenamiento de las dovelas ejecutadas con TBM?

Para acelerar el proceso de obtención de la resistencia de las dovelas se recurre al curado al vapor. Con ello se suele buscar resistencias a las 6 horas del orden de 25 MPa que permiten la manipulación de las piezas sin problemas de fisuración.

La aplicación de vapor se hace de acuerdo con las curvas establecidas por cada fabricante, en que en términos generales se establece un gradiente máximo de temperatura de 15 °C por hora para evitar choques térmicos.

2. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

3. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?
4. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Cuando se inicia una obra es preciso que el equipo y la maquinaria tengan un rodaje suficiente para poder producir con continuidad y sin errores. Este aspecto se conoce como curva de aprendizaje.

5. ¿Cuánto tiempo tarda la curva de aprendizaje para todas las etapas?

Acerca de la manipulación y el almacenamiento de las dovelas,

6. ¿Cuál es la actividad más importante durante esta etapa?

Desde la salida de fábrica las dovelas se transportan a diferentes acopios. El desplazamiento de las dovelas, dadas las condiciones tempranas que muestra el hormigón, puede darse el caso de que se produzcan pequeñas fisuraciones. De igual manera, se pueden producir otros desperfectos que afecten a las propiedades de la dovela.

7. ¿Hay riesgos importantes durante el periodo de transporte? Al moverlas con grúas/puentes grúas / toros
8. Si las dovelas tienen algún desperfecto, ya sean coqueras o pequeñas fisuraciones, se rechazan y no se utilizan? O, se reutilizan?

4. ACERCA DEL MANEJO

13. ¿Cuáles son los principales riesgos en el montaje de las dovelas ejecutadas con TBM?

En un anillo de revestimiento se distinguen dos tipos de juntas: juntas entre anillos contiguos y juntas entre dovelas del mismo anillo. Las primeras reciben el nombre de juntas transversales o circunferenciales, mientras que las segundas se denominan juntas radiales o longitudinales.

14. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?
15. ¿La junta es particularmente arriesgada? ¿Por qué?
16. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?
17. ¿Existe algún patrón para las fisuras de los segmentos en fase de montaje?Cuál es la explicación?

Por regla general, el anillo de dovela universal está compuesto por varias dovelas de tamaños similares y de una más pequeña, la clave, que cierra el anillo. En cuanto a las partes curvadas, los anillos se colocan alineando la clave, en cuanto a las partes derechas, se alternan los anillos con clave en la parte superior y clave en la parte inferior. Se juega con la posición relativa de las claves para hacer que varíe el radio de curvatura.

18. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

Las juntas transversales se encuentran sometidas a las cargas de compresión debidas al empuje, en ocasiones excéntrico, de la tuneladora; a esfuerzos cortantes originados por una presión no uniforme del terreno, y a las fuerzas resultantes del peso propio de dovelas que cuelgan durante el montaje del anillo.

19. ¿Es posible tener grietas circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Las barras de guiado permiten un posicionamiento y un centrado circunferencial más correcto de las dovelas. Ayudan, además, a agilizar la instalación de cada anillo. Las barras de guiado facilitan el ensamble de unas dovelas contra las otras

20. Es útil tener barras de guiado? Pueden ser reemplazadas por bi-conos de centrado?

Para construir un nuevo anillo R_{n+1} , el equipo de perforación de túneles hará en primer lugar la excavación apoyándose sobre el ultimo anillo R_n del revestimiento por medio de gatos hidráulicos. Se hace avanzar así el disco de corte en una longitud por lo menos igual a la de un anillo, pero teniendo cuidado de que el extremo posterior del escudo permanezca en contacto con el revestimiento ya construido.

21. ¿Cómo se pueden manejar los gatos hidráulicos para reducir las fisuraciones?

La inyección del mortero se realiza varios metros detrás del escudo. Con lo que gran parte del trasdós de varios anillos puede quedar momentáneamente vacío.

22. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

El equipo de perforación de túnel se apoya, para su avance, sobre el revestimiento ya realizado, son aplicadas presiones muy importantes sobre las caras laterales transversales al eje, e irregularidades de superficie, incluso pequeñas, pueden provocar concentraciones de esfuerzos que provoquen un agrietamiento de la dovela.

23. ¿Es posible para una dovela romper debido a una gran fisuración? ¿Por qué? Es posible repararlo?

24. ¿Cuáles son las mejores prácticas para la colocación de las dovelas?

5. ACERCA DE LA FINALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

El acabado son las tareas que siguen una vez se ha desmontado la tuneladora: soleras, pilares, losas intermedias...

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en las actividades de acabado con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles se construyen para diferentes funciones ya sea para carretera, tren, metro, etc... En el caso de la L9 de Barcelona, el túnel está dividido por una losa intermedia, dividiendo así el anillo en dos partes.

2. En su experiencia, es posible ejecutar otras actividades de construcción mientras la TBM está en funcionamiento?
3. ¿Es mejor construir la losa invertida sin ningún tratamiento adhesivo? ¿Cuáles son las razones para ello?

Las dovelas tienen puntos de conexión que permiten que al momento de la instalación de los anillos se coloquen unos pases que aseguran la posición y dan continuidad a las dovelas.

4. Es común que algunas dovelas puedan caer libremente desde el anillo? Cuáles son las razones?

6. ACERCA DEL ESTADO EN SERVICIO

1. ¿Cuáles son los principales riesgos involucrados en la etapa de servicio con elementos prefabricados de parte ejecutada con TBM?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de falla, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

2. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Las inspecciones de las dovelas se realizan a lo largo de la construcción del túnel y una vez en servicio.

3. ¿Considera que el riesgo de reparación tras que las obras hayan sido entregadas, son mayores que durante la construcción?
4. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?
5. ¿Es normal tener grietas durante la etapa de servicio? Bajo qué circunstancias?
6. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Los daños en la superficie del hormigón pueden estar fisurada originando que se filtre agua por dichas grietas.

7. ¿Cómo se controla, una vez acabado el túnel, no haya filtraciones de agua



8. Puede estar relaciona la posición de la clave con las filtraciones de agua?

7. ACERCA DE TODO EL PROCESO

Una vez valorado cada proceso por el que pasa la dovela, es decir, desde el momento de fabricación hasta la puesta en servicio, se han obtenido una serie de riesgos que afectan a la dovela en todo momento.

1. ¿Cuál es la etapa de mayor riesgo? ¿Por qué?
2. ¿Cómo pueden ser mitigados los riesgos en todo el ciclo de vida?
3. ¿Cuáles son los parámetros críticos para controlar un riesgo?

8. SUGERENCIAS PARA CENTRARSE EN FUTUROS ESTUDIOS



APPENDIX

1. Si las fibras de acero aparentemente proporcionan un mejor rendimiento, ¿por qué todavía se siguen fabricando las dovelas con hormigón armado?

Depende un poco de la filosofía del país en que se realiza el túnel, de los clientes... La inercia al cambio en el sector es muy grande. Además existen casos donde debido a las dimensiones de las dovelas y los esfuerzos de empuje de los gatos de la TBM es imposible prescindir de armadura convencional

Influye el hecho de que contratistas desconocen los métodos de diseño de las dovelas de HRF y, por tanto, su campo de aplicación y sus ventajas. Con lo que se ha de tener un cierto conocimiento de las técnicas de fabricación del HRF, y particularmente, el uso de aditivos para una buena trabajabilidad. También influyen los problemas normativos, en los que muy pocas normas admiten estructuras solas con fibras.

Se han encontrado problemas con las cargas localizadas, ya que en ciertos casos no se supo obtener una uniforme distribución de las fibras por problemas de dosificación, o no se supo evaluar correctamente la distribución de las cargas.

2. Es necesario mantener los orificios de inyección? Podrían ser suprimidos estos orificios?

Pueden ser suprimidos los orificios pero no es siempre prudente. Es necesario mantenerlos en geologías complicadas y en túneles en roca. En terrenos homogéneos blandos con las nuevas tecnologías se podrían evitar, gracias a los beneficios y eficiencia de la inyección de bicomponente.

3. ¿Cómo se puede colocar mejor el gasket o sello de impermeabilización? ¿En el hormigonado? O después del endurecimiento y curado?

Es mejor colocar el gasket en el hormigonado, es más rápido y queda mejor sujeto. Otros expertos consultados sostienen que es mejor colocarlos lo más tarde posible para evitar daños en el acopio a la intemperie: en este caso es necesario protegerlos.

4. Los gaskets son afectados por los daños?Cuál es el impacto?

Pueden verse afectados por golpes, desgarros o en general modificando su correcta posición, y el impacto es que se compromete el sistema de estanqueidad

También pueden verse afectados por el efecto del envejecimiento, exposición a la intemperie a temperaturas extremas (alto grado de sol / frío), golpes o daños en su manipulación, así como todo lo que conduzca a pérdida de estanqueidad...

5. ¿Qué disposiciones deben ser consideradas para las esquinas del segmento? ¿Cómo están mejor protegidas?

Hay diseños en que las esquinas les ponen un plástico para protegerlos, aunque la mejor protección es que tengan fibras que mejoran el comportamiento ante los golpes.

6. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias de un choque térmico en el caso de bajas temperaturas después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

- Hacer un pre-stock a continuación del curado para garantizar que la temperatura del hormigón se equilibra con la temperatura interna de la planta. Este proceso lleva 2 – 3 días y se ha aplicado en proyectos recientes en Canadá por ejemplo
- Garantizar que la diferencia máxima entre la temperatura del hormigón y la exterior en el parque de acopio no supere los 15°C
- Prolongar el desplazamiento de las dovelas entre la fábrica y la campa. Esto es delicado por la falta de espacio en la fábrica y el impacto en los ritmos de producción

7. ¿Cómo es posible evitar las consecuencias del choque de humedad en el caso de entornos altamente seco después del curado al vapor? ¿Tiene alguna experiencia al respecto o es algo infrecuente?

- Existen experiencias recientes que han servido para obtener soluciones ante este fenómeno
- Utilizar un hormigón con muy baja porosidad para evitar que se pierda humedad del mismo.
- Sumergir las dovelas o regarlas de forma abundante en fase de secado en la campa de acopio
- Revestir las dovelas con pintura impermeabilizante
- Se recomienda regar dos o tres días antes de que entren las dovelas en el túnel. En la campa no hacer nada. Este riego en definitiva es para hidratarlas y disminuir las tensiones
- Aislamiento con plásticos
- Modelizar los fenómenos termo-higrométricos que puedan preverse en función del ambiente de la campa de acopio al objeto de evaluar su impacto real.

8. ¿Cuál es la estrategia adoptada con respecto a los productos no conformes? ¿Se descarta el anillo o sólo la dovela? ¿Se pueden aprovechar?

Depende de la no conformidad. Si la no conformidad hace referencia a fisuras inaceptable o rotura, se descarta. En caso contrario, la tendencia es reparar y colocar. Pero en todo caso es preferible rechazar un anillo entero que una dovela, por el impacto que tiene en la producción.

9. ¿Cuál es la tendencia en las juntas de seguido mayormente en la actualidad? ¿Cómo afecta esto a los acabados y los daños?

Se debe evitar la existencia de juntas en cruz, es decir, que coincidan juntas transversales y longitudinales de diferentes anillos en un mismo punto. Por eso se montan de maneras diferentes. Si no siguen esta buena praxis, se generan puntos débiles en cuanto a estanquidad.

La junta pegada y la junta embebida se siguen usando. No obstante existe una tendencia a replantearse el uso de los pernos en las juntas circunferenciales, e incluso en las longitudinales si se emplean dovelas trapezoidales. Para eso es preciso emplear encofrados de alta calidad y con errores en la defunción de la forma casi inexistentes.

10. ¿Hay algún comportamiento diferente de la clave sobre su posición? ¿Más movimientos? ¿Más desperfectos? ¿Más goteras?

No siempre cierra en la misma posición la clave por el uso del anillo universal. La colocación de la pieza llave es siempre muy delicada.

Sí que hay comportamientos diferentes pero no tienen una base teórica. Hay posiciones que son algo más peligrosas.

Por ejemplo las claves a las 12 pueden tener una ligera obertura entre las contra claves, lo que puede repercutir en que la clave baje unos cm.

Hay peligro en túneles en que tienen altas presiones en la parte inferior y que la clave se encuentre en la parte baja. Esto puede ocasionar que en el momento de la inyección, la dovela pueda salir, ya que tiene mucha presión

11. ¿Cuál es la mejor estrategia para manejar la inyección y el control? ¿Cómo se garantiza que la inyección se realiza perfectamente?

En EPB se inyecta justo detrás del escudo, el relleno se hace completo siempre que se inyecte por todas las partes a presión.

En roca se suele inyectar entre un tercio y la mitad por la parte baja justo por debajo de la cola, lo otro se inyecta a través de las dovelas aproximadamente todos los anillos con lo que se genera un cono de llenado teórico correcto. Para asegurarse que se ha inyectado en todos los lugares se hacen catas perforando la dovela (por la parte que tienen un orificio) de manera que no taladras toda la dovela. Si al hacer la cata hay mortero bien, si no hay que inyectar otra vez.

12. ¿Cuál es la mejor manera de evitar fugas?

Si el túnel se ha ejecutado correctamente:

- Los gaskets deben trabajar bien comprimidos según su especificación
- El relleno del mortero del gap en el extradós debe ser perfectamente ejecutado

Si no se ha ejecutado correctamente:

- Se deben realizar inyecciones complementarias a través de los orificios o eventualmente mediante taladros ejecutados al efecto

13. ¿Cuál es el momento más probable de que la junta de lugar a una fisura?

Generalmente al entrar en carga. La circunferencial al aplicar los gatos, la radial al inyectar.

En la último momento de colocar la clave, como el hueco no esté lo suficientemente holgado se puede producir el arrollamiento de la junta, y puede también desprenderse alguna esquina.

14. ¿Cuáles son las principales fallas en la etapa de servicio según su propia experiencia: la degradación, grietas, incendios, terremotos, fugas, segmentos caída?

Los túneles dovelados, en general presentan distintos tipos de fallo, como son: agrietamiento excesivo de las dovelas, grandes rotaciones en las juntas entre dovelas, deformaciones de ovalamiento u ovalización debidas a las presiones de tierra y agua, etc.

Los principales problemas son los debidos a ovalización por cambios en las acciones del terreno (rellenos o excavaciones cercanas, variaciones en nivel freático). La falta de impermeabilidad genera problemas menores.

15. ¿Cuál es el mejor tratamiento para las fisuras durante la etapa de servicio? ¿Cómo se garantiza las fisuras no volverán a suceder?

Hay productos e inyecciones en base a materiales flexibles que dan buenos resultados en la reparación de fisuras en las que puede existir agua, incluso a presión

16. ¿Es posible tener fisuras circunferenciales? Bajo qué circunstancias?

Si, se pueden producir fisuras circunferenciales en:

- En fase de montaje del anillo el vuelo de la dovela es inadecuado o se produce alguna acción dinámica extraordinaria
- Si la rigidez entre anillos contiguos es muy distinta y en una se producen deformaciones excesivas. Si el suelo es blando, el anillo deformado se sobrecarga y aparecen flexiones longitudinales que podrían fisurar circunferencialmente el anillo. Es muy poco probable.
- Bajo cargas desmesuradas no previstas o que el anillo no soporte por defectos propios en la fabricación